Projet CFC/IGG - (FIGG/02)

Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio

CIRAD-IER-IRAG-IRSAT

Activité n°4

ANALYSE DES CARACTERISTIQUES TECHNOLOGIQUES ET CULINAIRES DU FONIO

Blanchiment mécanique et traditionnel du fonio

Effet sur le comportement à la cuisson, comparaison variétale

Maïmouna OUATTARA
Joël GRABULOS
Geneviève FLIEDEL

25 octobre 2002

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
Département des Cultures Annuelles
Avenue Agropolis 34398 Montpellier Cedex 5 – France
calim@cirad.fr

Résumé

Au cours de ce stage, nous avons mis au point au niveau du laboratoire des protocoles d'analyse de la qualité du fonio, céréale vêtue d'Afrique de l'Ouest à grains minuscules et germe très enchâssé dans l'albumen. En particulier, ont été développés les protocoles d'aptitude au décorticage du fonio paddy, d'aptitude au blanchiment du cargo, le protocole de cuisson à la vapeur du fonio blanchi et les protocoles d'évaluation de la consistance et du gonflement du fonio cuit, sachant que les critères de qualité du fonio recherchés par les consommateurs sont la blancheur du grain, le gonflement et la consistance moelleuse après cuisson.

Par ailleurs, nous avons étudié l'effet du blanchiment mécanique sur la qualité du blanchiment et le comportement à la cuisson du fonio cuit, comparé à un blanchiment traditionnel. Dans ce cadre, plusieurs variétés en provenance de Guinée ont été analysées.
Nous avons montré que le décortiqueur GMF, une adaptation du type Engelberg qui utilise le système de friction, arrive à décortiquer et à blanchir le fonio avec des caractéristiques proches de celles du fonio blanchi traditionnellement : le grain est bien dégermé, il gonfle bien et a une consistance moelleuse. A l'opposé, le blanchisseur de laboratoire Sataké qui use le grain par abrasion, dégerme moins et donne un grain après cuisson plus ferme et moins gonflé. Il apparaît donc que la qualité du blanchiment et notamment le dégermage est une caractéristique importante dans la qualité culinaire du produit.

Parmi les variétés analysées nous avons pu noter des différences de qualité culinaire à taux de blanchiment équivalents. La variété Siragué, qui est l'une des plus appréciées par les consommateurs guinéens, se détache des autres avec une capacité de gonflement plus élevée et une consistance plus moelleuse.

Mots – clés : céréale - fonio - blanchiment - qualité culinaire

SOMMAIRE

RESUME

SOMMAIRE

INTRODUCTION 1

PRÉSENTATION DU CIRAD 3

GENERALITES SUR LE FONIO 4

MATERIEL ET METHODES 14

OPTIMISATIONS 23

- **I - Optimisation du décorticage du fonio paddy** 24
- **II - Optimisation du blanchiment** 28
- **III - Optimisation du protocole de cuisson** 34
- **IV - Optimisation du protocole de mesure de la consistance du fonio cuit** 35

EFFET DU BLANCHIMENT ET COMPARAISON VARIETALE 41

INFLUENCE DU BLANCHIMENT 42

- **I- Comparaison du blanchiment traditionnel et du blanchiment mécanique** 42
- **II- Effet du blanchiment progressif** 44

COMPARAISON VARIETALE 47

CONCLUSION 52

BIBLIOGRAPHIE 54

ANNEXES 57

INTRODUCTION

Le fonio est une denrée très appréciée au plan culinaire et diététique. Réputée comme étant la céréale la plus savoureuse du fait de sa finesse et de ses qualités gustatives, il est généralement servi lors des cérémonies importantes. En ville, on le recherche à l'occasion des fêtes. Le fonio est considéré comme une culture secondaire dont la transformation est essentiellement manuelle et la production faible. Sa particularité réside dans la petite taille de ses grains, dans ses qualités gustatives et nutritionnelles.

Bien que répandue en Afrique de l'Ouest, cette céréale a longtemps été ignorée des programmes de vulgarisation et de recherche. Sa précocité en fait un aliment de soudure dans sa zone de culture. Cette céréale est de plus en plus délaissée en milieu urbain car sa transformation est une succession d'opérations pénibles et les femmes modernes recherchent de plus en plus des produits prêts à consommer.

Compte tenu de toutes ces caractéristiques - rusticité, précocité, perspectives culinaires et commerciales attrayantes- le fonio suscite un regain d'intérêt avec le démarrage des programmes de recherches depuis quelques années. La décision de créer le projet « amélioration des technologies post-récoltes du fonio » a été prise à l'unanimité au cours du séminaire qui lui a été consacré en juin 1994 à Bamako.

Dans le cadre de la promotion des céréales en Afrique de l'Ouest, le Common Fund for Commodities (CFC) a financé ces travaux portant sur l'amélioration des technologies post récolte du fonio. C'est un projet régional d'une durée de quatre ans qui a démarré en 1999 et qui doit prendre fin en 2003. Il est supervisé par la FAO et regroupe les Instituts de Recherche nationaux du Mali (IER), de la Guinée (IRAG) et du Burkina Faso (IRSAT) et le CIRAD est le maître d'œuvre. L'objectif principal de ce projet est de mécaniser toutes les étapes de la transformation du fonio afin de :

- 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 au mieux à l'exportation.
- diminuer les coûts de transformation.

Pour atteindre ces objectifs trois équipes de chercheurs ont été mises sur pied au CIRAD et dans les trois pays concernés:

- une équipe de socio-économistes pour réaliser les enquêtes de consommation au début et à la fin du projet,
- une équipe de machinistes qui a pour rôle de tester tous les équipements existants dans les pays concernés, d'identifier les machines pouvant être adaptées ou modifiées et au besoin créer de nouvelles machines pour traiter cette céréale. C'est ainsi que la machine GMF (Guinée- Mali- France), une adaptation de la décortiqueuse de type ENGELBERG et un cribleur rotatif manuel ont été mis au point et sont toujours en cours d'optimisation.
- une équipe de technologues dont le rôle est de :

  * mieux connaître la céréale fonio : sa structure, sa composition, sa valeur nutritionnelle par rapport aux autres céréales cultivées dans la sous-région (mil et sorgho surtout)

* 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 en un produit précuit prêt à être commercialisé.

* étudier la qualité du fonio blanchi et précuit issu des différents essais d'équipement

* diversifier et valoriser les produits transformés (développer de nouveaux produits).

Notre stage au sein de l'équipe Qualité des Produits du CIRAD, a pour but d'apprécier l'effet du décorticage et du blanchiment mécanique sur le comportement du fonio à la cuisson en comparaison avec le décorticage et le blanchiment traditionnels. Il est essentiel 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 déjà réalisées, les premiers critères de qualité portent sur la blancheur, la propreté apparente du produit, le gonflement à la cuisson et surtout l'absence de sable.

Ce rapport fait dans un premier temps un résumé des connaissances déjà acquises sur le fonio. Des essais d'optimisation du décorticage, du blanchiment et de mesure de la qualité culinaire (gonflement et mesure de consistance du produit cuit) sont ensuite développés. La comparaison du fonio blanchi mécaniquement et traditionnellement sur la qualité culinaire du fonio.

Notre objectif personnel est de contribuer au succès de ce projet qui permettra certainement d'améliorer le quotidien des femmes africaines.

PRESENTATION DU CIRAD

Le CIRAD ou Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement est un organisme scientifique français spécialisé en recherche agronomique appliquée aux régions chaudes. Il a pour mission de contribuer au développement rural des pays tropicaux et subtropicaux par :

-des recherches
-des réalisations expérimentales
-des actions de formation en France et à l'étranger
-l'information scientifique et technique.

Ses activités recouvrent non seulement les domaines des sciences agronomiques mais aussi vétérinaires, forestières et agro- alimentaires.
Il coopère avec plus de 90 pays d'Afrique, d'Asie, du Pacifique, d'Amérique latine et d'Europe.
Il dispose d'un effectif de 1800 personnes dont 900 cadres.
50 % environ des chercheurs sont expatriés dans 50 pays où ils travaillent au sein de structures nationales ou en appui à des opérations de développement, et dans la France de l'outre-mer : Guadeloupe, Martinique, Guyane, Réunion, Mayotte, Nouvelle-Calédonie, Polynésie française. Les autres sont basés dans un dispositif de recherche en France : à Montpellier, en région parisienne, en Corse.

Le CIRAD est une organisation de 28 programmes répartis dans 7 départements que sont :

- Cultures pérennes (CIRAD- CP)
- Productions fruitières et horticoles (CIRAD- FLHOR)
- Elevage et médecine vétérinaire (CIRAD- EMVT)
- Forêts (CIRAD- FORET)
- Territoires, environnements et acteurs (CIRAD- TERA)
- Amélioration des méthodes pour l'innovation scientifique (CIRAD- AMIS)
- Cultures annuelles (CIRAD- CA).

Le département Cultures annuelles qui a pour objectif de contribuer à la sécurité alimentaire et au développement des pays, est celui où nous avons effectué notre stage, au sein du Programme Cultures Alimentaires, dans l'Equipe Qualité des Produits dirigée par Monsieur Jean-Leu Marchand.

Nous avons travaillé dans le cadre du projet fonio dont le Coordonnateur général est Monsieur Francis Troude.

GENERALITES SUR LE FONIO

Le fonio, une monocotylédone glumacée de la famille des graminées et du genre *Digitaria,* est considéré comme la plus ancienne céréale indigène d'Afrique occidentale. Elle résiste assez bien à la sécheresse et s'adapte mieux que toute autre à la faible fertilité des sols. Son aire de culture se situe entre les 8ème et 14 ème parallèles nord, du Sénégal au Lac Tchad (PORTERES R., 1955).

Il s'agit d'une plante annuelle mesurant 30 à 80 cm à maturité. Les semis se font en début de saison des pluies (mai, juin) et la récolte se fait deux mois et demi plus tard, ce qui sous -entend qu'elle arrive en période de soudure, avant toutes les autres céréales.

Les statistiques de la FAO montrent une forte diminution de la production (de 180 000 à 130 000 T) au cours des décennies 60 et 70. A partir de 1998, on constate en Afrique occidentale un accroissement de la production qui passe de 232 427 T en 1999 à 260 896 T en l'an 2000. Celle de l'année 2001 est de 265 700 T, la superficie cultivée de 361 987 ha et le rendement de 734 kg/ha. Les principaux pays africains producteurs de fonio sont : la Guinée, le Nigeria, le Mali, le Burkina Faso et la Côte d'Ivoire.

Tableau n°1 : Production de fonio (en T) en fonction des pays et par année

PAYS	1998	1999	2000	2001
Guinée	117 553	95 000	123 000	123 000
Nigeria	68 000	71 000	76 000	76 000
Mali	20 000	31 252	22 738	21 418
Burkina Faso	14 424	13 343	17 758	23 882
Côte d'Ivoire	15 000	15 000	15 000	15 000
Afrique occidentale	239 109	232 427	260 896	265 700

Source : Banque de données statistiques de la FAO (1998-2001)

MORPHOLOGIE DU GRAIN

L'étude morphologique du grain de fonio a été réalisée par le laboratoire de technologie alimentaire au CIRAD à Montpellier (BUI-PHONG F., 1998).

Le fonio est une céréale vêtue dont le caryopse après battage reste entouré de glumes et de glumelles (fonio paddy). Le grain 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 0,5g (Figure 1).

Le caryopse (grain décortiqué ou cargo) 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 qui contient 40 à 60 % de fibres. Le germe, relativement gros et contenant l'essentiel des réserves lipidiques, est séparé de l'albumen par le scutellum. L'albumen, limité par la couche à aleurone, est constitué principalement de grains d'amidon et accessoirement d'un réseau protéique. Il représente l'essentiel du fonio blanchi soit 85 % du poids du grain. Lors du blanchiment, le son composé du péricarpe et du germe est éliminé ainsi que la couche à aleurone qui est riche en protéines et en matières minérales (Figure 2).

Figure 1 : Grains de fonio paddy, décortiqués et blanchis

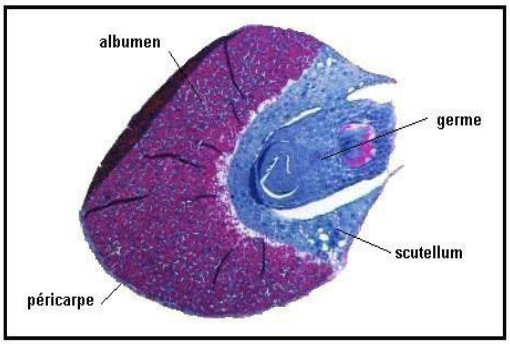


Figure 2 : Coupe du caryopse de fonio

LA RECOLTE DU FONIO

La culture du fonio est encore essentiellement manuelle. Aux premières pluies, le semis est fait à la volée sur un sol superficiellement ameubli (CRUZ J. F., 2001).
D'une manière générale dans les pays producteurs de fonio, les sols sont défrichés en février/mars en montagne et en mai/juin sur les coteaux. Les labours débutent en mai et juin et les semis s'échelonnent de juin à mi-août avec une prédominance en juillet. Les travaux d'entretien consistent en deux ou trois désherbages, la clôture et la surveillance des champs contre les animaux sauvages (singes, phacochères) et les oiseaux.

Les récoltes sont réalisées de septembre à novembre avec un maximum en octobre. La moisson est faite à la faucille par les hommes et les tiges coupées sont assemblées par les femmes en petites gerbes de 1 à 3 kg puis transportées près des habitations pour les protéger des éventuelles pluies.

OPERATIONS POST-RECOLTE

Les gerbes rassemblées en meules sont placées sur des plates formes pour permettre un séchage au soleil. Ce stockage en meules peut durer de quelques jours à plusieurs mois en attendant le battage qui est fait sur des nattes, des bâches en plastiques ou à même le sol. Après cette opération qui est réalisée à l'aide de bâtons ou par foulage au pied, les grains sont tamisés avec des paniers tressés qui retiennent les impuretés grossières. Après vannage, les grains sont séchés au soleil puis stockés dans des greniers en attendant d'être transformés.

TRANSFORMATION PRIMAIRE DU FONIO

La transformation du fonio paddy en fonio blanchi se fait par le décorticage et le blanchiment. Le décorticage consiste à enlever les balles du grain vêtu (glumes et glumelles) pour obtenir le caryopse nu et le but du blanchiment est d'aboutir à un grain blanc en éliminant le son (péricarpe et germe) (Figure 3).

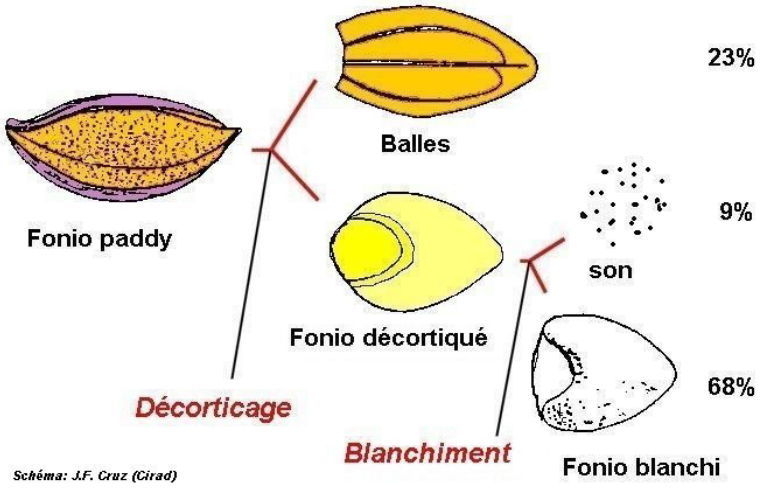


Figure 3 : Diagramme de transformation du fonio

Les techniques traditionnelles de transformation

La première étape consiste en un nettoyage grossier des grains à l'aide de deux tamis successifs : le premier d'environ 2 mm d'ouverture de maille est utilisé pour enlever les grosses particules étrangères et le deuxième d'environ 1 mm d'ouverture de maille sert à éliminer la terre, la poussière et les grains peu remplis ou immatures (FLIEDEL G. et al., 2001).

Le décorticage et le blanchiment sont réalisés traditionnellement par les femmes au moyen de mortiers et de pilons. 5 pilages successifs entrecoupés de vannages sont effectués pour éliminer progressivement les balles, le péricarpe et le germe jusqu'à obtenir un grain parfaitement blanc. Le rendement correspondant en pourcentage du paddy de cette transformation primaire est de l'ordre de 68 à 69% après blanchiment complet (FLIEDEL G. et al., 2001).

Après le 5è pilage, commence le lavage du fonio blanchi : une grande quantité d'eau est versée sur le fonio qui est brassé à la main pour éliminer les fines particules, la poussière et les sons avec le surnageant. Cette opération est répétée cinq fois d'à filée. Ensuite les femmes procèdent à une élimination progressive, minutieuse et totale de la terre. Pour cela, elles plongent la calebasse contenant le grain blanchi lavé dans une bassine d'eau propre, commencent par petits mouvements de balancier et de rotation à faire tomber petit à petit le grain dans l'eau en reprenant régulièrement de l'eau pour poursuivre l'entraînement. Lorsque tout le grain est entraîné, seule la terre rouge reste au fond de la calebasse et est mise de côté. L'excédent d'eau qui recouvre le grain est éliminé et le fonio récupéré avec la calebasse puis elles refont la même opération d'entraînement du grain dans l'eau avec séparation de la terre qui reste seule à la fin dans la calebasse. Ceci représente le premier lavage pour éliminer la terre et sera reproduit deux voire trois fois de plus si nécessaire. La plus grande partie de la terre est éliminée lors de ce premier lavage (FLIEDEL G. et al., 2001). Les grains de sable ayant les mêmes dimensions que les grains de fonio sont très difficiles à éliminer. De cette étape très longue et fastidieuse, dépend la qualité du produit fini : le fonio doit être débarrassé de tout son sable sans être imbibé d'eau. Le lavage nécessite une main d'œuvre importante et de grandes quantités d'eau (400 l pour 25 kg de fonio) (SACKO S. et al., 2000). Dans nos

villages où l'eau courante fait parfois défaut, la ménagère peut parcourir 2 voire 3 km à pied pour se rendre au marigot.

Viennent ensuite les étapes de l'essorage et de la 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. Ou encore, le tamis contenant les grains mouillés est enveloppé dans un tissu propre; ce linge en main, les ménagères font des mouvements de rotation de l'épaule, d'avant en arrière créant ainsi une force centrifuge qui chasse l'eau des grains. Les grains blanchis, lavés et essorés peuvent être séchés, précuits à la vapeur puis séchés, ou préparés selon différentes recettes.

La transformation mécanisée

Au Mali, les premières tentatives de décorticage mécanique du fonio ont commencé en 1990 avec une décortiqueuse à céréales de grande capacité (type Nuhull) et avec un décortiqueur à mil et sorgho (type RIIC du Botswana). Les tests réalisés dans la région de Koutiala donnaient des rendements d'usinage voisins de 50 %.

En Guinée, un programme sur le décorticage mécanique a été réalisé en 1994, à l'instigation de la FAO, en collaboration avec le Groupement des Artisans de Labé « GALAMA ». Il a porté sur l'adaptation au fonio de petits décortiqueurs de type Engelberg mais il n'a pas donné de résultats probants.

Au Burkina Faso, M SANOGO de Bobo-dioulasso, qui disposait d'un petit blanchisseur à cône chinois habituellement utilisé pour le riz, a tenté de l'utiliser pour le fonio. Les rendements d'usinage ne dépassent pas 40 à 45 %, le taux de pertes est voisin de 35 % et le coût d'opération est largement supérieur au coût du décorticage manuel.

Au Sénégal, un décortiqueur à fonio a été inventé en 1993 par M. Sanoussi DIAKITE, il a été réalisé par le Lycée technique industriel Delafosse. Cette machine permet un décorticage par abrasion et peut fonctionner avec un moteur électrique ou thermique. Les premiers essais indiquent un rendement de décorticage supérieur à 90 % et un taux de brisures nul. Ce décortiqueur a connu un début de commercialisation à partir de 1998 (CRUZ J.F., 2001).

LA TRANSFORMATION SECONDAIRE DU FONIO

Cette transformation secondaire est également très peu mécanisée. Une fois le fonio lavé et essoré, il peut être séché, précuit ou préparé selon plusieurs recettes.
Le fonio précuit correspond à du fonio cuit une fois à la vapeur et mis à sécher au soleil sur des aires de séchage ou dans un séchoir artificiel (ATESTA). La cuisson est réalisée dans une passoire traditionnelle qui est tapissée d'un linge en coton de couleur blanche en général. Cette passoire surmonte une grande marmite en fonte contenant de l'eau portée à ébullition. Pour retenir la vapeur d'eau, les ménagères colmatent la jonction entre les deux récipients avec une pâte faite avec de la farine de maïs ou avec un chiffon mouillé. Cet ensemble est posé sur un foyer traditionnel alimenté par des bûches de bois. Ce fonio cuit séché est ensuite conditionné en petits sacs plastiques et vendu dans les supermarchés ou exporté vers les USA ou l'Europe (CRUZ J. F., 2001).

Le fonio lavé peut être préparé selon différentes recettes :

Le foyo :
Le fonio est cuit 3 fois à la vapeur comme du couscous. Il est dégusté avec de la sauce légume (courgette, carottes, aubergines, choux, piment, poisson ou viande), de la sauce arachide ou de la sauce gombo. Parfois le gombo haché finement est cuit à la vapeur avec le fonio.

Le fonio est cuisiné selon d'autres recettes : le fonio au gras ou *fini zagamin*, la bouillie de fonio ou *fini baga,* le dèguè de fonio ou *fini dèguè* ou encore le tô de fonio (*fini tô*). En période de récolte, il peut être délayé dans du lait de vache pasteurisé traditionnellement et consommé au petit déjeuner.

D'autres produits tels que des boissons alcoolisées issues de la brasserie du fonio sont vendues sur les marchés locaux dans certains pays : au nord du Togo, une fameuse bière appelée « le tchapalo » est faite à parti du fonio.

PREMIERS RESULTATS OBTENUS DANS LE CADRE DU PROJET

Battage

Après examen des différents matériels utilisés dans la sous-région pour le battage d'autres céréales, des batteuses, dérivées de la batteuse IRRI conçue pour le battage du riz, ont été testées pour le fonio. En Guinée, les premiers essais de battage réalisés sur la batteuse ASSI, fabriquée au Sénégal, sont très prometteurs. Des essais sont également en cours au Burkina Faso avec une batteuse IRSAT (batteuse IRRI modifiée).

Nettoyage - vannage

Au Mali, les essais de nettoyage avec un tamiseur rotatif (crible rotatif manuel) de l'IER sur du fonio paddy et décortiqué ont donné des résultats satisfaisants.
En Guinée, le nettoyage du fonio paddy réalisé avec le tarare manuel Alvan Blanch est très encourageant.
Que ce soit en Guinée ou au Mali, ces machines sont toujours en cours d'optimisation.

Décorticage – blanchiment

Au Mali, des essais montrent que le nouveau modèle de la machine « Sanoussi » assure bien le décorticage et le blanchiment.

En Guinée, des essais réalisés sur un petit modèle du décortiqueur à riz chinois CCIEC adapté au fonio, montrent des performances supérieures aux machines déjà présentes sur le terrain.
Suite à des résultats satisfaisants sur des machines de type Engelberg, un modèle spécifique fonio a été développé en utilisant ce principe. La maquette a été réalisée au CIRAD et après plusieurs modifications, les essais réalisés sur le terrain en Guinée ont donné des performances intéressantes tant en matière de débit (voisin de 100 kg/h) qu'en terme de rendement de décorticage (supérieur à 97 %).
Ce décortiqueur appelé GMF (Guinée – Mali - France) est le fruit d'une étroite collaboration entre l'IRAG, le CIRAD et l'IER. Les plans ont été réalisés et fournis par le CIRAD à des équipementiers à Bamako pour une fabrication locale (MAROUZE C. et al., 2002).

Principe de fonctionnement du décortiqueur GMF

Les grains sont mis en pression dans la chambre de décorticage et poussés axialement par un rotor nervuré. Tout au long de leur avancement, sur la longueur du cylindre, les grains sont cisaillés et subissent une action de friction entre les nervures longitudinales du rotor et la lame fixée au cylindre qui freine les grains dans leur mouvement de rotation.
Les trappes placées à l'entrée et à la sortie de la chambre de décorticage règlent le débit et le fonctionnement. La fermeture de la trappe de sortie freine la sortie des grains donc accroît leur pression interne dans la chambre ce qui augmente le taux de décorticage et inversement pour une ouverture de la trappe. La mise au point d'un tel principe pour le décorticage du fonio se révèle délicate ; il faut assurer une pression suffisante pour décortiquer sans provoquer ni trop de brisures, ni de bourrage.

Le décorticage du fonio paddy en deux passages assure, sans dégradation excessive du débit global de la machine, de meilleurs rendements d'usinage et de taux de décorticage (MAROUZE C. et al., 2001).

Le premier prototype de cet appareil a été fabriqué au Mali en collaboration avec la société IMAF. Un pilote de canal de vannage a aussi été réalisé par la même société au Mali pour être utilisé à la sortie du décortiqueur GMF (CRUZ J. F. et al., mars 2002). Ces machines sont en cours d'expérimentation dans les trois pays concernés par le projet.

Lavage

Cette opération délicate est très difficile à réaliser. Deux principes sont actuellement à l'étude et leurs maquettes ont été réalisées au CIRAD (MAROUZE C. et BUFFETAUD B., 2000) :

- *Le laveur à hélice* qui un dispositif de brossage à contre-courant pour l'élimination des sons et des poussières adhérentes aux grains et l'élimination des quelques grains de paddy restant dans le fonio blanchi.

- *Le dessableur hydrolift* qui est un système de séparation par densité pour l'élimination des sables.

COMPOSITION BIOCHIMIQUE DU GRAIN DE FONIO

Le fonio est encore une céréale très peu connue. Il est recommandé dans certains pays pour l'alimentation des enfants, des personnes âgées et des personnes souffrant du diabète et d'ulcère. Sa composition biochimique suscite un intérêt spécial du fait de ses qualités diététiques.
Pour connaître la valeur nutritionnelle du fonio, des travaux sur sa composition biochimique ont été réalisés au cours de l'année 2000 par le laboratoire de technologie alimentaire au CIRAD à Montpellier.

Les résultats suivants sont une synthèse de tous les travaux de recherches réalisés au CIRAD sur différentes variétés de fonio depuis le début du projet (FLIEDEL G. et al., 2001). Le matériel végétal utilisé est soit du fonio cargo soit du fonio blanchi traditionnellement ou mécaniquement, broyé, lavé ou non.

Le tableau ci-dessous met en évidence la composition biochimique moyenne du fonio décortiqué et du fonio blanchi :

Tableau n° 2 : Composition du grain de fonio décortiqué et blanchi

	Protéines (% m.s.)	Lipides (% m.s.)	Matières minérales (% m.s.)	Amidon (% m.s.)	Sucres (% m.s.)	Fibres % m.s.
Fonio cargo	9 – 11	3,5 – 4,0	0,9 – 1,2	74 - 79	0,9 - 1,2	6,5 – 8.5
Fonio blanchi	7 – 8	0,6 – 0,8	0,4 – 0,6	85 – 88	0,04 – 0,08	4 - 5

La composition moyenne du fonio a été comparée à celle d'autres céréales (voir Tableau n° 3)

Tableau n° 3: Composition du grain de fonio décortiqué par rapport aux autres céréales

Constituants	Protéines % m.s.	Lipides % m.s.	Matières minérales % m.s.	Glucides % m.s.
Fonio cargo	9 - 11	3,5 – 4,0	0,9 – 1,2	81 - 88
Sorgho entier	10 - 12	3,5 – 4,0	1,6 – 1,8	82 - 85
Mil entier	10 - 12	4,5 – 5,0	1,6 – 2,0	81 - 84
Riz cargo	9	2,5	1,5	86

Tableau n° 4: Composition en acides aminés du fonio décortiqué comparé à d'autres céréales

Acide aminé (g/16gN)	Fonio décortiqué	Riz cargo	maïs	mil	Sorgho	Teff
Phénylalanine	5,7	5,1	4,6	4,1	4,9	4,0
Isoleucine	4,0	4,7	3,4	3,9	4,0	3,2
Leucine	10,5	8,8	12,0	9,5	13,5	6,0
Lysine	2,5	4,1	2,5	3,2	2,1	2,3
Méthionine	4,5	3,1	1,2	1,8	1,3	2,1
Thréonine	3,7	3,7	3,2	3,3	3,3	2,8
Tryptophane	1,6	1,1	0,6	1,4	1,0	1,2
Valine	5,5	6,4	4,1	4,9	5,0	4,1
Cystéine	2,5	2,6	1,4	1,8	1,3	1,9
Tyrosine	3,5	4,6	3,0	3,0	3,1	1,7

Tous les travaux réalisés jusqu'à présent montrent que le fonio a globalement la même composition biochimique que toutes les autres céréales. Son albumen est plus proche de celui du riz et la composition de son germe rappelle celui du sorgho ou du mil.
Une fois lavé, le grain de fonio n'est pas plus riche en matières minérales et en protéines que les autres céréales. Par contre, on remarque une plus grande concentration en soufre en tant que cargo et il est plus riche en amidon en tant que grain blanchi.

Comme toutes les autres céréales, le fonio est déficitaire en lysine mais le fait le plus notable est « le taux anormalement élevé en méthionine dont la teneur est la plus élevée qui ait jamais été trouvée dans un matériel végétal » (DE LUMEN B. O. et al. 1986) (CARBIENER R. et al. 1960).

Le fonio et le diabète

La prévalence du diabète de type II est de plus en plus élevée dans les pays en développement touchant notamment la population active. Cet accroissement peut s'expliquer en partie par la modification des habitudes alimentaires liées à l'urbanisation et à la fréquence élevée de la surcharge pondérale.
Le fonio aurait des propriétés antidiabétiques en ralentissant l'absorption des sucres rapides par rapport aux autres céréales locales telles que le sorgho, le mil et le riz. Une étude antérieure au département CIRAD-CA a montré qu'en comparaison à un riz blanc cuit cette céréale semble plus adaptée aux diabétiques car l'index glycémique est plus faible après absorption de fonio blanchi cuit. En outre, des mesures post-prandiales ont souligné l'étalement dans le temps de l'assimilation des sucres (BESANÇON S., 2000).
Le fonio pourrait être également recommandé en cas de diabète insulino- dépendant du fait de sa richesse en acides aminés soufrés et insulinosecréteurs. Il contient une quantité importante de fibres et peu de facteurs antinutritionnels (FLIEDEL G. et al. 2001).
Certains auteurs tels que SARTELET et al. (1996), lui ont trouvé des propriétés antithyroïdiennes.
Une autre étude réalisée dans le cadre du projet fonio (ROSSIGNOL C., 2001) semble confirmer la première. Mais aucune des deux études ne permet de conclure que le fonio a de réelles propriétés antidiabétiques étant donné qu'elles n'ont pas été réalisées dans les mêmes conditions : le fonio a été consommé avec des sauces différentes d'une étude à l'autre.

LA COMMERCIALISATION DU FONIO

D'une manière générale, dans les pays producteurs de fonio, les variétés précoces (70 à 100 j de cycle végétatif) sont destinées à l'autoconsommation pendant la période de soudure alors que les variétés tardives sont réservées à la consommation annuelle et à la vente. La part destinée à la vente et aux semences représente 20 à 25 % seulement du total. Il s'agit d'un petit commerce limité à l'Afrique occidentale qui fait intervenir les grossistes, les semi-grossistes et les détaillants. Ces derniers achètent le fonio aux grossistes et le revendent sur tous les marchés. Les prix peuvent doubler de la période de récolte à la période de soudure, c'est une céréale onéreuse qui est 2 à 3 fois plus chère que le riz. Sur les marchés, le fonio vendu peut être décortiqué, lavé ou blanchi. Au Mali, certains magasins d'alimentation proposent également du fonio précuit conditionné en sachets à des prix nettement plus élevés.

LE FONIO EN COTE D'IVOIRE

Le fonio est une céréale produite uniquement au nord de la Côte d'Ivoire où le climat de type sahélien (savane) se prête à cette culture. Il est très peu connu dans les autres régions et est consommé dans les grandes villes du pays par la forte communauté d'Ivoiriens originaires du nord.
Depuis 1994, la production du fonio est passée de 10 000 à 15 000 T en 1997 et elle stagne depuis lors. Cette stagnation s'explique en partie par l'inexistence des moyens de recherche consacrés à ce produit considéré comme une denrée secondaire et d'autre part par le désintérêt de plus en plus grandissant que connaît cette culture.

Tableau n° 5: Production de fonio en Côte d'Ivoire

	1994	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**
Superficie Cultivée (ha)	15 000	17 000	19 000	22 000	22 000	22 000	22 000	22 000
Rendement (kg/ha)	6,667	7,059	6,842	6,818	6,818	6,818	6,818	6,818
Production (T)	10 000	12 000	13 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000

Source : Banque de données FAO

Environ 60 à 70 % de la production est réservée à l'autoconsommation ; la part destinée aux semences et aux pertes varie entre 30 et 40 %. La Côte d'Ivoire n'est pas un pays exportateur de fonio. Le fonio est consommé localement dans les zones de production et celui vendu dans les grandes villes provient des pays limitrophes. Il ne fait pas l'objet d'un commerce important : les grossistes achètent de grandes quantités de fonio blanchi et paddy au Mali et en Guinée, le transportent à leurs propres frais et le revendent aux détaillants dans les grandes villes. Le grain paddy est stocké dans des entrepôts et décortiqué selon les besoins. Les détaillants ont une clientèle essentiellement domestique et les transactions sur ce produit constituent une activité annexe dans les marchés. En outre, cette céréale n'est ni vendue dans les alimentations ni sur les grandes surfaces et les restaurateurs en proposent d'ailleurs rarement à leurs clients. Un kilogramme de fonio blanchi peut être deux voire trois fois plus cher que la même quantité de riz ou de mil selon les saisons.

La transformation du fonio est totalement traditionnelle dans les comtés du nord : elle se fait également au pilon et au mortier en petite quantité destinée à la consommation. Tous ces inconvénients, à savoir la petitesse du grain et les longues étapes de transformation, contribuent à reléguer cette céréale au second plan. Elle est de ce fait de moins en moins cuisinée par les femmes modernes en Côte d'Ivoire.

MATERIEL ET METHODES

I – Matériel végétal

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

Les essais de mise au point du décorticage, du blanchiment, de la cuisson et de la texture, ont porté sur deux vracs venant du Mali. Le premier vrac était déjà disponible dans l'équipe de Conception des équipements au CIRAD. Il a été récolté en l'an 2000 et a été acheté sur un des marchés de Bamako (vrac Bamako 2000). Le second est originaire de la région de Koutiala, village de Fingoloni. Il a été récolté en septembre 2001 (vrac Fingoloni 2001).

Deux fonio blanchis à partir du vrac Fingoloni l'un traditionnellement par Mme SOUMARE et l'autre au décortiqueur – blanchisseur GMF. Ces deux fonio blanchis ont été utilisés pour comparer le blanchiment traditionnel et mécanique.

Cinq variétés originaires de Guinée produites en août- septembre 2001,

- Kenselen
- Siragué
- Bolefendé
- Mbalia
- et Ravé,

ont été utilisées pour voir s'il était possible de distinguer des différences de qualité technologique et culinaire entre les variétés.

II – Méthodes

Le nettoyage des grains

Selon la quantité de matière première disponible, le nettoyage des grains de fonio paddy a été effectué par tamisage en utilisant deux types de tamiseurs. Dans les deux cas, on a pu séparer les fines impuretés (les grains immatures et le sable fin) et les grosses particules (la paille, les graines étrangères, les gros cailloux et les pierres) présentes dans le fonio, grâce à un jeu de deux tamis.

Le tamiseur à courant d'air Alpine type 200 LS a été utilisé au niveau du laboratoire pour tamiser les quantités inférieures à 1 kg, par lot de 100 grammes.
Le principe de cet appareil repose sur un 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 variables. Cette buse est couplée à un aspirateur constituant ainsi un système de dégommage très performant et permettant une séparation parfaite des particules.
100 grammes de fonio sont déposés sur un tamis de 1000 µm d'ouverture de maille. Après tamisage de deux minutes pour séparer les grosses particules, le passant est récupéré pour être à nouveau tamisé sur un tamis d'ouverture de maille de 710 µm qui laisse passer les fines impuretés.
Le taux de grosses impuretés est la masse du refus du tamis de 1000 µm rapporté au pourcentage de la masse initiale. Le taux de fines impuretés et de grains immatures est la masse du passant du tamis de 710 µm rapporté au pourcentage de la masse initiale.

Tamiseur à courant d'air Alpine type 200 LS

Le nettoyeur-calibreur Tripette et Renaud NSL 2000 a été utilisé pour nettoyer les quantités supérieures à 1 kg.
C'est une machine polyvalente, fonctionnant en continu, et qui est utilisée pour trier toutes sortes de graines sèches. Elle est constituée 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 compte tenu du fait que le tamisage est moins précis que celui obtenu avec l'Alpine, les tamis choisis ont été de 1,5 mm pour retenir les grosses particules (tamis du haut) et de 1 mm d'ouverture de mailles (tamis du bas) pour laisser passer les fines particules. Le dégommage est favorisé grâce à la présence de billes inertes à l'intérieur de chaque tamis. On récupère ensuite un grain propre entre ces deux tamis.

Le décorticage des grains paddy

Le décorticage consiste à éliminer les balles des grains de fonio paddy pour obtenir des grains de fonio cargo. Un décortiqueur de laboratoire à rouleaux de caoutchouc de marque Sataké habituellement utilisé pour le riz a été adapté au fonio.

Le principe de fonctionnement de cet appareil repose sur le passage du grain paddy entre deux rouleaux de caoutchouc qui tournent en sens inverse et qui sont animés de vitesses différentes 1 et 1,25. L'écartement entre les rouleaux est fonction de la taille des grains à décortiquer et il est réglé par une vis positionnée sur le côté de l'appareil. La vitesse différentielle entre les rouleaux provoque un phénomène de friction à la surface des balles qui sont ainsi arrachées, puis entraînées dans un cyclone par un système de ventilation. Le grain cargo est récupéré dans des récipients. L'alimentation des grains peut se faire en continu ou par patch grâce à une trémie d'alimentation dont le débit est réglé par une molette. Le grain est introduit dans un entonnoir de 100 ml placé dans cette trémie (voir schéma et photos ci-contre).

Pour décortiquer au mieux le fonio, les rouleaux de caoutchouc ont été resserrés, la ventilation réglée au minimum, la trappe d'alimentation réduite au maximum et la sortie de l'entonnoir freinée par la vis de serrage. Deux passages des grains ont été effectués. Malgré cette ventilation minimum, les grains légers immatures et les brisures sont également entraînés par le cyclone. Parfois pour quantifier leur présence, nous avons recyclé les balles en les passant au décortiqueur, après avoir desserré au maximum les rouleaux de caoutchouc.

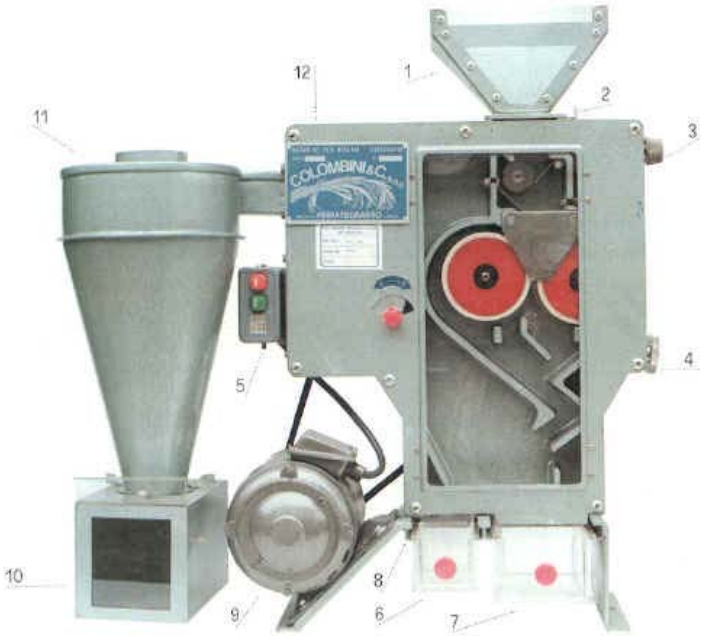
Le rendement de décorticage est calculé de façon précise sur chaque prise d'essai en récupérant les projections de grains autour des récipients de collecte des grains. C'est le pourcentage de la masse des grains cargo par rapport à celles des grains paddy pesés au départ.

Dans le cadre de ce travail, le décorticage a fait l'objet d'une optimisation supplémentaire en recherchant :

- la quantité optimale de grains à faire passer pour chaque essai
- un écartement approprié des rouleaux de caoutchouc.

L'échantillonnage

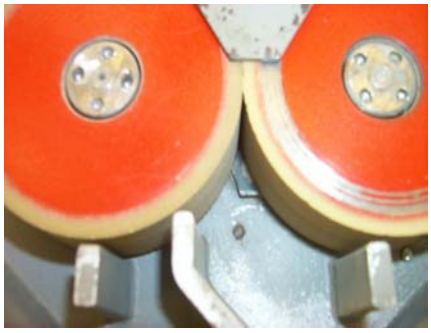
Il a été fait sur des grains cargo ou blanchis dans le but de prélever des quantités de grains représentatifs du lot de départ. Le matériel utilisé est un diviseur d'échantillon type conique (modèle Boerner-USA) de laboratoire. L'échantillon, placé dans la trémie supérieure



Décortiqueur de laboratoire mod G. 390/R

1. Trémie
2. Volet de réglage
3. Poignée de réglage alimentation paddy
4. Réglage de l'espace entre les deux rouleaux
5. Disjoncteur
6. Dépot pour grains verts
7. Dépot pour grains cargo
8. Volet de réglage selection
9. Moteur
10. Dépot réception balles
11. Cyclone
12. Aspirateur ventilateur

Vis de réglage des rouleaux



Rouleaux de caoutchouc

Entoinoir de 100 ml placé dans la trémie d'alimentation

est libéré par une vanne à main. Il rencontre le sommet d'un cône et s'écoule, régulièrement réparti, sur la surface extérieure de celui-ci. Tout autour de la base de ce cône sont disposées 36 cloisons divisant l'échantillon en autant de fractions égales. La trémie inférieure reconstitue l'échantillon initial en deux moitiés qui sont acheminés dans deux récipients.
Le lot de départ est mélangé par trois passages successifs dans l'échantillonneur avec mélange des deux fractions obtenues à chaque passage. Puis nous avons échantillonné par passages successifs d'une seule fraction jusqu'à obtention de la quantité désirée (voir photo).

Le pourcentage de paddy présents

Le but est de déterminer le nombre de grains non décortiqués (grains paddy) dans chaque lot de fonio cargo. On constitue avec l'échantillonneur deux échantillons représentatifs de 1 g à partir de chaque lot. On procède ensuite à la séparation et au comptage des grains non décortiqués en s'aidant d'une loupe et d'une spatule pour faire le tri.
Le taux de paddy se calcule en se référant au pourcentage du poids des grains paddy rapporté au poids de l'échantillon initial. Cette opération a été effectuée en double dans chaque cas.

Le blanchiment

Les opérations de blanchiment ont été faites sur un blanchisseur à meule Sataké auparavant utilisé pour le riz. Le blanchiment se fait par abrasion à l'aide d'un disque abrasif (la meule) tournant autour d'un axe horizontal dans une chambre perforée remplie à moitié de grains. La chambre est délimitée par un grillage fin adapté à la taille des grains de fonio. Ce grillage est soutenu par une grille métallique qui a un pourcentage de vide assez élevé pour laisser passer le son. Pour le blanchiment du fonio, la capacité de la chambre de blanchiment et la taille des trous de la grille perforée ont été réduites. Grâce à un système de courroie, la vitesse de rotation de la meule peut être réglée et quatre vitesses (maximale, moyenne I, moyenne II et minimale) ont pu être testées.

Après blanchiment, les grains sont débarrassés des sons, qui n'ont pas pu être séparés spontanément à travers le grillage, par tamisage à 400 µm avec l'Alpine.

Dans le cadre de notre stage, une optimisation du blanchiment a été réalisée en étudiant les paramètres suivants :

- la charge initiale
- la durée de blanchiment
- le type de meule : la meule n° 36 utilisée pour le riz et une autre meule de granulométrie plus fine n° 46 achetée spécialement pour le fonio.
- la vitesse du blanchiment.

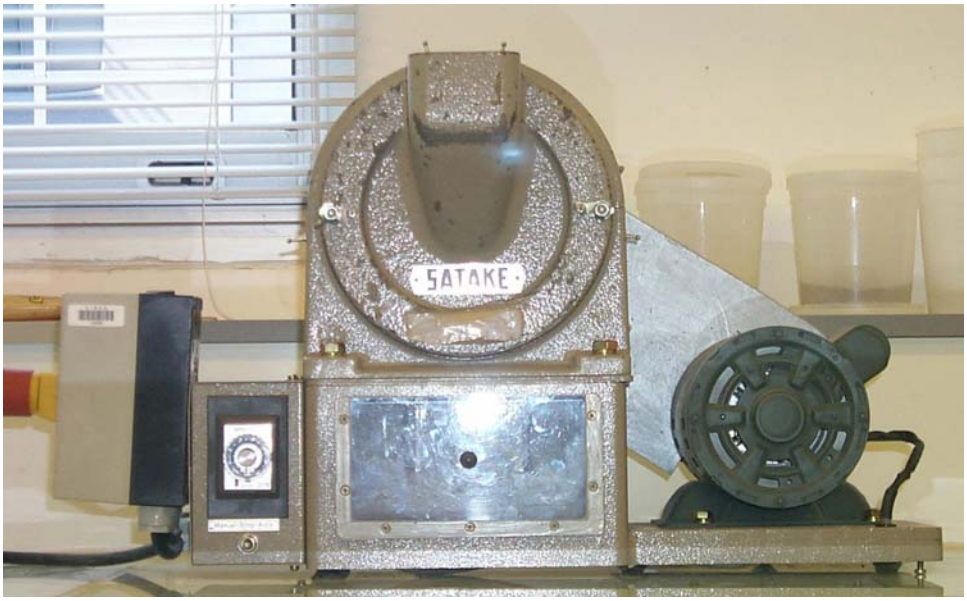
Le but est d'arriver à un degré de blanchiment correct avec peu de cargo, peu de brisures et un bon dégermage, pour avoir une qualité de grain proche de celle obtenue par les femmes traditionnellement.

Analyse de la qualité du fonio blanchi

On évaluera la qualité du fonio blanchi en mesurant la quantité de brisures présentes dans le grain, en évaluant le degré de blanchiment pour savoir si l'usure est satisfaisante et en appréciant la pureté des grains (présence de sable, de sons et de poussières).

Diviseur d'échantillon type conique

Meule abrasive



Blanchisseur à meule abrasive Sataké

Système de courroies permettant de régler la vitesse

Grillage fin soutenu par la grille métallique

Le blanchiment

La détermination du taux de brisures

Le taux de brisures a été déterminé par tamisage manuel en utilisant un tamis de 500 µm et un réceptacle qui sont préalablement tarés. Un échantillon de 30 g de fonio blanchi est prélevé puis tamisé jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de transfert de grains du tamis vers le réceptacle. La fraction collectée dans le réceptacle est pesée. Le taux de brisures est calculé comme étant le poids du passant au travers du tamis de 500 µm rapporté à 100 g du poids de l'échantillon.
L'opération a été répétée sur un second échantillon pour faire une moyenne des deux résultats.

Le degré de blanchiment

Il a pour but d'évaluer visuellement la présence de grains cargo et de grains avec des sons adhérents dans le fonio blanchi en utilisant la coloration de MAY GRÜNWALD. Cette coloration à base de bleu de méthylène-éosine dans l'éthanol, habituellement utilisée sur le riz, colore l'albumen en rose et le péricarpe en vert. Selon le degré de blanchiment les grains virent au rose, au vert ou un mélange des deux couleurs et les paddy gardent leur couleur initiale marron.

Préparation du colorant de MAY GRÜNWALD : on mélange une solution aqueuse de bleu de méthylène à 1% et une solution aqueuse d'éosine yellow à 1%. Le surnageant est jeté après centrifugation du mélange à 1800 tours /min. Le culot est lavé deux fois en ajoutant 10 ml d'eau distillée, centrifugé pendant 5 min et le surnageant séparé. Pour obtenir, notre réactif de MAY GRÜNWALD concentré, 350 grammes environ de culot séché sont dissous dans 100 ml d'éthanol, le mélange est laissé reposer durant une nuit après avoir remué régulièrement pour dissoudre et homogénéiser la solution. Le colorant est obtenu en diluant cette solution au tiers avec de l'éthanol (un volume de réactif pour trois volumes d'éthanol).

Coloration des échantillons : des échantillons d'1 g sont constitués à partir de fonio blanchi grâce à l'échantillonneur. De l'eau distillée est ajoutée au fonio jusqu'à immersion complète des grains flottants pendant 1 min environ. Après avoir égoutté les grains, ce même échantillon est immergé dans le colorant de MAY GRÜNWALD pendant deux minutes puis les grains sont lavés 3 fois de suite avec 3 ml d'éthanol pendant 30 à 45 secondes. Ils sont ensuite étalés sur du papier absorbant et laissés sécher à l'air libre.

Observation des grains à la binoculaire : on peut juger de la qualité du blanchiment en observant les grains colorés à la binoculaire (présence de sons adhérents, présence ou non de germe, de grains cargo). Les grains colorés en rose sont dépourvus de leurs sons adhérents et sont dits blanchis. Les grains qui apparaissent avec du vert sont des grains avec des sons adhérents toujours présents (cargo ou préblanchis).
Une échelle de constatation du degré de blanchiment en fonction des variations de couleur peut être mise en place :

Valeur dans l'échelle	*Degré de blanchiment*	*Coloration*
1	Bien blanchi	Rose
2	Assez bien blanchi	Rose et peu de vert
3	Moyennement blanchi	Mélange rose et vert
4	Mal blanchi	Majorité de vert
5	Non blanchi	Vert

L'évaluation du taux de sons non adhérents et de petits cailloux

La pureté de l'échantillon blanchi est vérifiée en utilisant deux lavages successifs :

1. Un premier lavage qui permet de quantifier les particules en suspension (les sons non adhérents, la poussière, la terre et les grains immatures). Un échantillon de fonio de 60 grammes est mis dans un récipient de 500 ml et on y ajoute 200 ml d'eau distillée. A l'aide d'une spatule on mélange le tout et on récupère le surnageant avec les particules en suspension dans un bécher taré d'au moins 600 ml. Pour retenir le fonio blanchi on peut s'aider d'un chinois. Cette opération est réalisée trois fois. L'eau sale contenue dans le bécher est ensuite évaporée sur une plaque chauffante à 350°C jusqu'à ce qu'il ne reste que quelques ml d'eau. L'évaporation se termine dans une étuve à 100°C jusqu'à poids constant puis le bêcher est pesé pour obtenir le pourcentage de particules légères en suspension.

2. Un deuxième lavage qui permet de déterminer le taux de cailloux et de sable. Ces cailloux n'ont pas pu être séparés par tamisage car ils ont la même taille que les grains de fonio. De l'eau distillée est ajoutée au fonio précédemment lavé. Un mouvement de balancier est réalisé pour séparer le fonio des cailloux et des grains de sable qui sont plus denses. Les grains sont ainsi entraînés par l'eau et recueillis dans la bassine et les grains de sable restent dans le fond du pot grâce à une différence de densité. Les particules lourdes (cailloux et de sable) sont récupérées puis séchées à l'étuve à 70°C. Cette opération est réalisée deux voire trois fois.

Le lavage des grains blanchis

La technique précédemment décrite de deux lavages successifs peut être utilisée pour laver tout simplement le grain sans pour autant quantifier le taux d'impuretés. Ainsi ont été débarrassés des sons, poussière ou terre

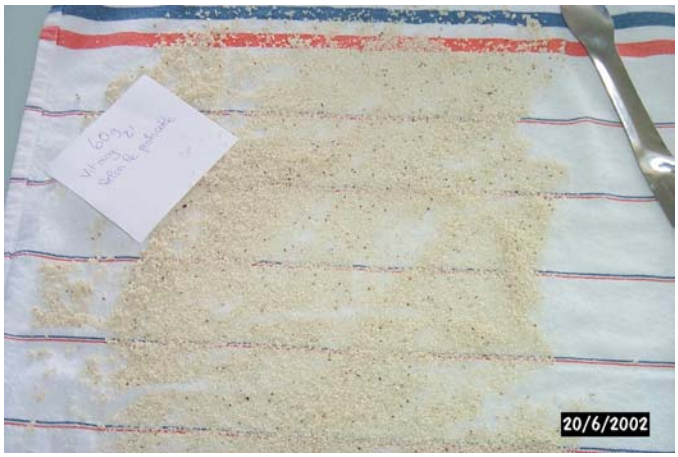
- les grains cargo ou blanchis avant toute analyse biochimique
- les grains blanchis avant de procéder à leur cuisson.

Le fonio propre ainsi obtenu est étalé sur une serviette et mis à sécher sur la paillasse pendant 48 h jusqu'à ce que sa teneur en eau avoisine 12 %. Le produit est ensuite mis dans un récipient hermétiquement fermé. Sa teneur en eau, évaluée au bout de 48 h, est nécessaire pour rapporter sa composition biochimique en pourcentage de matière sèche et pour calculer son taux de réhydratation pendant la cuisson.

La cuisson du fonio blanchi

60 grammes de fonio lavés et séchés sont préalablement réhydratés et laissés reposer quelques minutes dans une barquette avant d'être cuits trois fois à la vapeur. On procède à une nouvelle humidification des grains et à un émottage après chacune des deux premières cuissons. Le taux de réhydratation à atteindre sera précisé lors des essais de mise au point. Les cuissons ont été réalisées dans un couscoussier composé d'un récipient de 4 litres contenant un litre et demi d'eau désionisée à ébullition ; il est surmonté d'une passoire de 16 cm de diamètre dont les orifices permettent le passage de la vapeur d'eau. Le fonio est bien étalé dans la passoire dont le fond est tapissé d'un linge en coton. L'ensemble est porté à ébullition sur une plaque

Le lavage du
fonio blanchi



Séchage à l'air ambiant sur la paillasse

chauffante à 300° C. L'eau désionisée du couscoussier est changée après chaque essai (et le linge en coton lavé et séché).

La masse de fonio, la durée de chaque cuisson à la vapeur et la quantité d'eau désionisée nécessaire à l'humidification des grains, ont été définis au cours des essais de mise au point.
Sur le fonio cuit, on évaluera le gonflement et la texture.
Deux essais de cuisson sont effectués par échantillon.

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 sur du produit cuit à la vapeur. Un échantillon d'environ deux grammes de fonio cuit est mis dans un pilulier préalablement taré et est déshydraté 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.
Le gonflement du produit cuit est exprimé en g d'eau pour 100 g d'échantillon de fonio cuit.

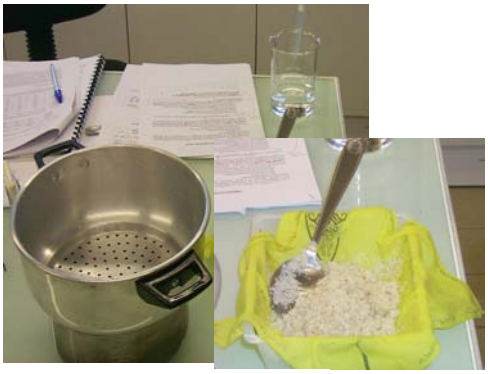
La consistance du fonio cuit

La consistance du fonio cuit a été mesurée à l'INSTRON (Universal Food Testing Machine type 4300) en effectuant des tests d'extrusion du produit poussé par un piston au travers d'une grille. Après cuisson, l'échantillon de fonio cuit est transféré dans la cellule d'extrusion OTTAWA (modèle réduit de 7,5 cm² de surface d'extrusion). Au fur et à mesure de la descente du piston à la vitesse constante de 100 mm/mn, le capteur de force enregistre tout d'abord une force de résistance à la compression (en Newtons) qui augmente jusqu'à ce que le produit passe à travers la grille d'extrusion située au fond de la cellule ; à ce moment-là, la force devient constante : c'est la force d'extrusion qui dépend de la fermeté du produit. Plus le produit est ferme, plus la force d'extrusion est élevée. Une cellule suffisamment remplie permet d'avoir une aire sous la courbe plus représentative pour la lecture de la mesure. L'ordinateur relié au texturomètre permet de visualiser un graphique représentant la force d'extrusion donnée en Newtons en fonction du déplacement en mm. Des limites sont spécifiées sur la courbe d'essai grâce à un curseur.
Quatre valeurs sont calculées :

- l'énergie totale (kgf.cm) correspond à la surface totale sous la courbe (du point 0 au dernier point)
- l'énergie entre les limites est la surface sous la courbe entre les limites que nous avons fixées (kgf.cm).
- la force moyenne d'extrusion entre les limites (kgf).
- la contrainte moyenne d'extrusion qui est la force d'extrusion rapportée à une section du piston (kgf/cm²)

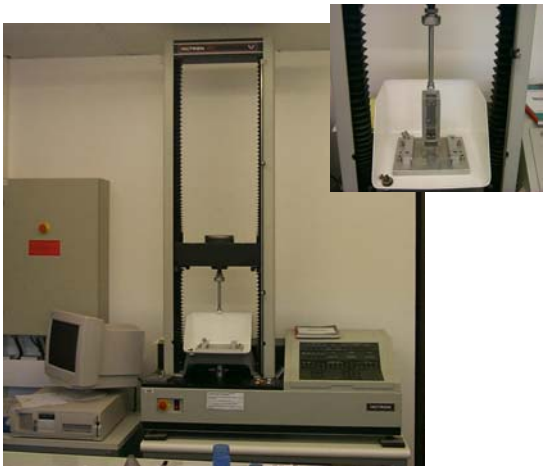
NB : 1kgf correspond à 9.81 N et la section du piston est égale à 6,76 cm².

Quatre répétitions sont effectuées par variété.
Deux mesures de consistance ont été effectuées par échantillon de fonio cuit.



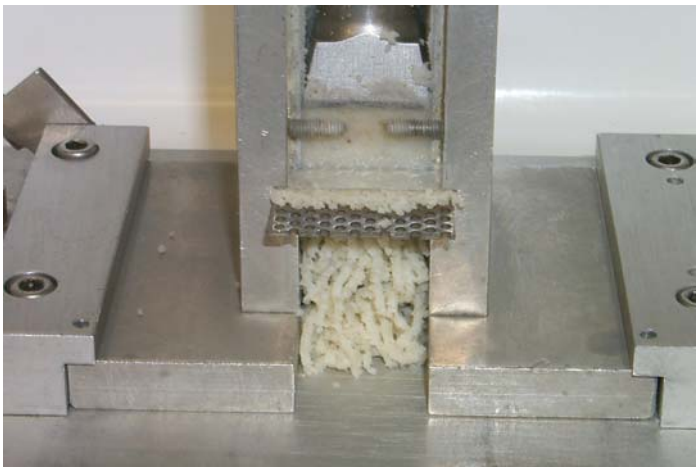
Cuisson du fonio : émottage et hydratation

Fonio cuit dans le pillulier
pour la mesure du gonflement



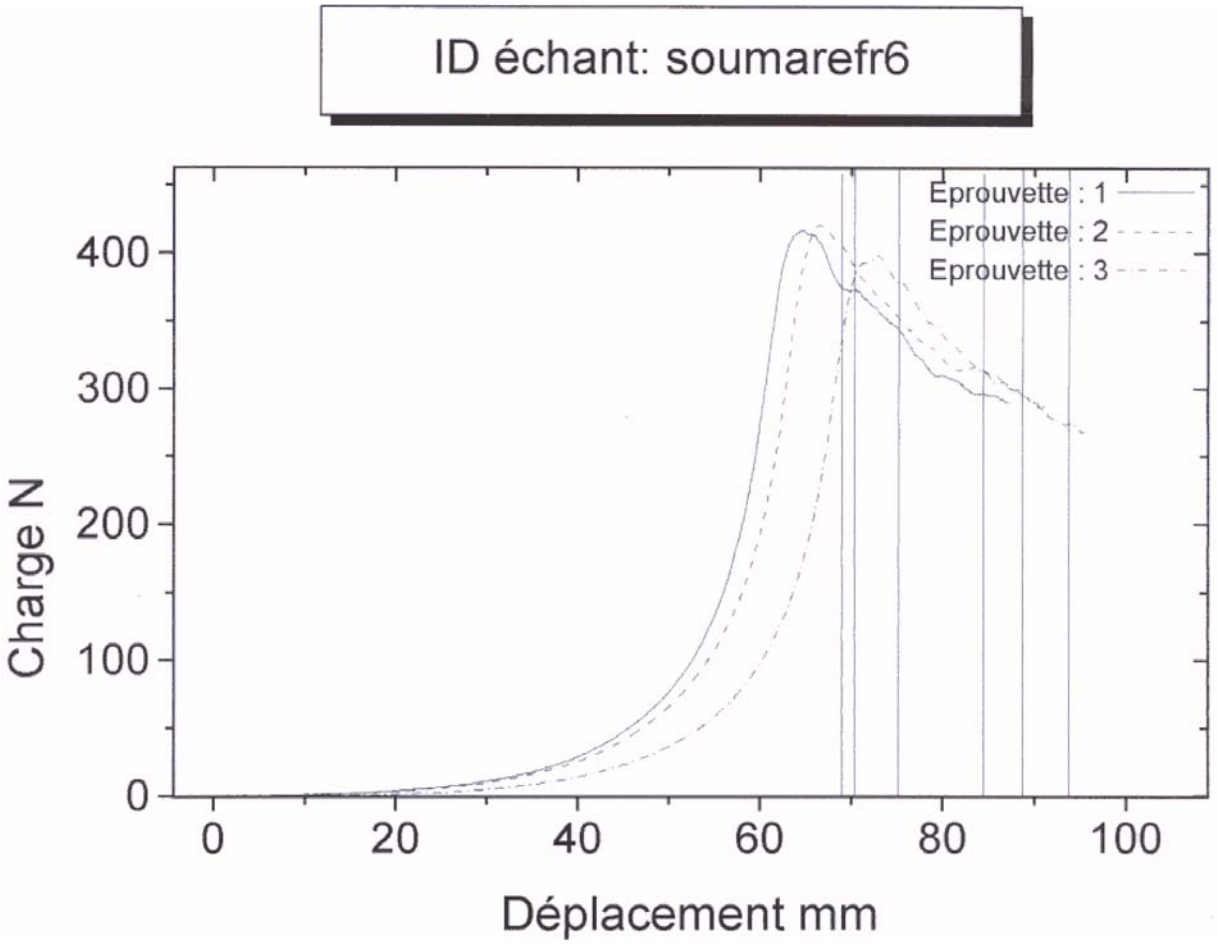
Le texturomètre Instron et la cellule Ottawa

Remplissage de la cellule Ottawa



Extrusion du fonio cuit au travers de la grille

Graphique des mesures de texture à l'Instron



Commentaires

essai 19-03-1 / J1-

	Energie jusqu'à la rupture (kgf-cm)	Chge moy. entre les limites 1 (kgf)	Ctr. moy. entre les limites 1 (kgf/cm^2)	Energie entre les limites 1 (kgf-mm)
1	118.466	33.938	5.020	523.223
2	126.098	34.012	5.031	623.553
3	117.249	32.409	4.794	599.515
Moyenne	120.604	33.453	4.949	582.097
E.T.	4.796	0.905	0.134	52.384
C.V.	3.977	2.705	2.705	8.999
Minimum	117.249	32.409	4.794	523.223
Maximum	126.098	34.012	5.031	623.553

Quatre grilles d'extrusion ont également été testées :
la première est celle habituellement utilisée pour le riz (grille n°1), elle comporte 14 orifices de 6 mm de diamètre chacun, la seconde (grille n°2) a 27 orifices de 4 mm, la troisième (grille n°3) a 48 orifices de 2,5 mm et la dernière (grille n°4) a 70 orifices de 2 mm de diamètre chacun.

La température du produit cuit, le délai entre la cuisson et la mesure, ainsi que le choix de la grille d'extrusion seront précisés au cours des essais de mise au point.

Les analyses chimiques

Elles ont été effectuées sur produit cru lavé, séché, cargo ou blanchi obtenu en laboratoire mais également sur les fonio blanchis lavés obtenus traditionnellement par Mme SOUMARE ou issus de la machine GMF. Tous les échantillons ont été broyés avec le broyeur à marteaux de laboratoire Perten pour avoir une idée de la composition biochimique du grain cargo ou du fonio blanchi mécaniquement ou traditionnellement.

La teneur en eau

La pesée différentielle avant et après passage au four CHOPIN (130° C pendant 2 h) de 5 g d'échantillon broyé permet d'évaluer l'humidité de chaque échantillon de fonio. La quantité d'eau présente dans chaque échantillon rapportée à la masse initiale de l'échantillon en pourcent donne la teneur en eau.

La teneur en matières minérales

Les matières minérales ou cendres sont concentrées à la périphérie du grain. La détermination de la teneur en cendres du grain permet d'apprécier le degré de décorticage.
5 g d'échantillon de fonio cargo ou blanchi, sont broyés et calcinés dans un four à cendres à 900°C pendant 3 h. La pesée différentielle avant et après calcination permet de déterminer le taux de matières minérales de l'échantillon en pourcentage de la matière sèche.

La teneur en lipides

La détermination de la quantité de lipides permet de juger du degré de dégermage du grain car leur présence entraîne un lent rancissement et donc une mauvaise conservation du grain.
Les lipides sont extraits selon la méthode Soxhlet avec le distillateur Tecator Soxtec type HT. L'extraction se fait à 100°C par trempage (20 mn) dans l'éther diéthylique de 5 g d'échantillon broyé, suivi d'un rinçage (40 mn) de l'échantillon à l'éther. Après évaporation (10 mn) de l'éther, la quantité de matières grasses recueillies est pesée et exprimée en pourcentage de la masse de l'échantillon rapporté à la matière sèche.

La teneur en protéines

La détermination de la teneur en protéines du grain est importante pour connaître la valeur nutritionnelle du grain cargo et blanchi et savoir si l'usure par friction ou par abrasion n'est pas trop poussée.
La quantité de protéines totales est calculée à partir de la teneur en azote en utilisant le facteur de conversion 6,25. L'appareil utilisé est un Kjeltec 1030 Tecator. L'azote protéique est mesuré par la méthode de Kjeldahl sur 1 g d'échantillon broyé et minéralisé par 12 ml d'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur, le Kjeltabs CT/5 (5 g $K_2 SO_4$; 0,15 g TiO_2 ; 0,15 g Cu SO_4, $5H_2O$) et puis distillé en présence de soude concentrée.

La teneur en amylose

La teneur en amylose et les températures de gélatinisation sont 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 (Mestres et al.,1996). 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.

Les analyses statistiques

L'analyse statistiques des mesures de consistances à l'Instron a été faite avec le logiciel Stat ITCF.

OPTIMISATIONS

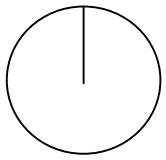
Pour comparer l'effet du blanchiment mécanique et traditionnel sur la qualité culinaire et pour comparer le comportement à la cuisson de différentes variétés, il a été nécessaire au sein du laboratoire de développer des tests de décorticage, de blanchiment, de cuisson et de mesure de texture, fiables et répétables, qui nous permettent de détecter sur de petites quantités de grains, d'éventuelles différences.

I - Optimisation du décorticage du fonio paddy

Elle a consisté à rechercher en parallèle la charge optimale de grains à décortiquer et l'écartement idéal des rouleaux de caoutchouc du décortiqueur SATAKE. Les essais de décorticage ont été faits sur le vrac Bamako 2000 dont l'humidité était de 9,2 %. L'écartement idéal doit permettre d'obtenir non seulement un bon rendement au décorticage avec un minimum de brisures et un minimum de paddy présents parmi les grains cargo, mais aussi d'amoindrir autant que possible l'usure des rouleaux de caoutchouc.

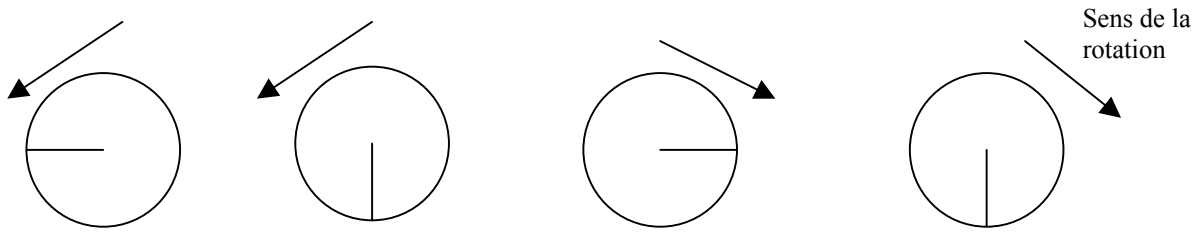
I-1 L'écartement des rouleaux de caoutchouc

Pour cela des essais avec différentes quantités de fonio ont été faits à plusieurs degrés d'écartement des rouleaux. Nous avons pour ainsi dire défini une position M qui permet de voir à peine un filet de jour entre les rouleaux de caoutchouc. Dans cette position, l'indicateur de la vis de réglage se trouve à 90° (voir schéma ci-dessous).



Vis de réglage en position M

En partant de cette position de référence M nous avons serré et desserré les rouleaux de caoutchouc : pour serrer, on tourne la vis dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et vice versa.



Position ¼ serrée par rapport à M | Position ½ serrée par rapport à M | Position ¼ desserrée par rapport à M | Position ½ desserrée par rapport à M

Pour s'affranchir des jeux mécaniques, il faut toujours tourner la vis de réglage dans le même sens. Nous avons dans nos manœuvres, choisi de toujours desserrer (tourner la vis dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport à M) de cinq tours complets à partir de la position M puis de revenir à la position souhaitée en resserrant.

En guise d'exemple, pour serrer les rouleaux à partir de la position M, on desserre de cinq tours complets puis on resserre de cinq tours et un quart pour la position ¼ serré ou de cinq tours et demi pour se mettre en position ½ serrée. Pour desserrer par rapport à M, on procède comme dans le premier cas mais on resserre de quatre tours et demi (position ½ desserré) ou de quatre tours et trois quart (position ¼ desserré).

I-2 La charge optimale

Des essais préalables de passage de grains dans l'entonnoir ont été effectués en continu ou par patch dans le laboratoire de Qualité des Produits du CIRAD. Le passage en continu (quantités supérieures à 300 g) a été éliminé parce qu'il provoquait un échauffement des rouleaux (fumée et odeur de caoutchouc) et le taux de paddy présents après deux passages, était trop élevé. Compte tenu de la taille de l'entonnoir mais aussi des essais antérieurs effectués par l'équipe Conception des équipements du CIRAD, seules les quantités de 50 et de 100 g ont été testées.
Les résultats des tests de différents degrés d'écartement des rouleaux sur la charge sont mentionnés dans le tableau ci-dessous :

I-3 L'aptitude au décorticage des grains de fonio paddy

Un grain paddy aura une bonne aptitude au décorticage, s'il a :
- un bon rendement de l'ordre de 77 %
- un faible taux de brisures (environ 0,2 %)
- et peu de paddy restants (inférieur à 0,5 %)

Cette aptitude au décorticage dépend des conditions opératoires et de la matière première elle-même.
Pour ce vrac Bamako 2000, nous avons étudié l'effet du réglage des rouleaux de caoutchouc et de la charge en grains sur la qualité du décorticage.

Tableau n°6 : Rendement au décorticage, taux de brisures et de paddy restants selon l'écartement des rouleaux de caoutchouc et la quantité de grains

Poids des échantillons (g)	Position par rapport à M	Rendement en grains cargo (%)	Taux de brisures (%)	Taux de paddy (%)
50	½ serré	78,2	0,15	
50	¼ serré	79,2	0,20	
50	**M**	**78,1**	**0,15**	
50	¼ desserré	80,4	0,15	
50	½ desserré	82,1	0,12	
100	½ serré	80,8	0,17	0,06
100	¼ serré	80,5	0,20	0,24
100	**M**	**80,9**	**0,16**	**0,29**
100	¼ desserré	81,1	0,14	0,59
100	½ desserré	80,9	0,14	0,72

Nous constatons, quels que soient la quantité de grains (50 ou 100 g) et le réglage des rouleaux de caoutchouc, un rendement de l'ordre de 78-80 %, et des taux de brisures faibles (0,1 – 0,2 %) et quasi superposables.

Pour une charge de 100 g, lorsque la vis de réglage est serrée par rapport à la position M, nous avons pu noter une légère diminution du taux de paddy (notamment à la position ½ serrée), pour un rendement et un taux de brisures équivalents. Mais à cette position, les rouleaux de caoutchouc s'usent et commencent à fumer. Lorsque la vis est desserrée par rapport à la position M, nous avons pu constater pour des rendements et des taux de brisures équivalents, une légère augmentation des paddy présents, supérieur à 0,5 %. Selon ces résultats, nous avons décidé de choisir la position M pour le décorticage.
Les résultats étant similaires pour les deux charges testées, nous avons opté pour la charge de 100 g par soucis d'obtenir plus de quantités de grains cargo à chaque essai.

I-4 Essais de répétabilité du test de décorticage

D'autres essais ont été entrepris pour voir la répétabilité et la fiabilité du décorticage à cette position M avec le même vrac Bamako 2000 puis sur le second vrac Fingoloni 2001 et les variétés.

Tableau n° 7 : Analyse de variance des rendements au décorticage des différents fonio

FONIO	Nombre d'essais	Rendement au décorticage en %			Ecart type	Coefficient de variation (%)
		Maximum	Minimum	Moyenne		
Vrac Bamako 2000	28	80,3	76,3	78,5	1,3	1,6
Vrac Fingoloni 2001	29	78,5	76,3	77	0,7	0,9
Kenselen	11	79,2	77	78,2	0,8	1,0
Siragué	11	77,5	73,9	76	1,1	1,5
Bolefendé	11	78,8	75,9	77,4	1	1,3
Mbalia	9	72,5	68,2	70	1,3	1,9
Ravé	7	75,3	74,6	74,7	0,3	0,4

On constate que les rendements au décorticage sont quasi superposables, en moyenne de l'ordre de 76-78 % pour les deux vracs et les variétés Kenselen, Siragué, Bolefendé. Par contre, pour les variétés Mbalia et Ravé, les rendements sont globalement plus bas, respectivement de 70 et 74,7 %. Leur plus faible rendement au décorticage peut laisser supposer que les grains se sont brisés au cours du décorticage ou peut être que leurs balles sont plus importantes en quantité (plus longues ou plus épaisses) que celles des autres variétés. Or l'observation des balles de ces deux variétés, a montré la présence de grains immatures que nous avons pu séparer et quantifier après passage (recyclage) des balles dans le décortiqueur : 7,5 % pour la variété Mbalia et 5,5 % pour la variété Ravé, ce qui correspond à la différence de rendement avec les autres variétés. Ces grains plus légers ont été entraînés par le cyclone du décortiqueur malgré une ventilation réglée au minimum et un calibrage préalable des variétés au tamiseur à courant d'air Alpine. Ces petits grains effilés sont également présents dans les autres variétés mais dans des proportions plus faibles : environ 1 à 2 %.

Nous pouvons conclure que les deux fonio vrac du Mali et les variétés guinéennes, Kenselen, Siragué et Bolefendé, qui ont des rendements équivalents, très peu de brisures et peu de grains immatures, ont une bonne aptitude au décorticage tout à fait similaire. Les deux autres qui sont des variétés à petits grains se détachent légèrement avec des rendements un tout petit peu plus bas, et beaucoup plus de grains immatures.

Quels que soient le nombre d'essais et la variété, les écarts types sont faibles ce qui montre qu'il y a peu de dispersion autour de la moyenne des rendements au décorticage de chaque variété. Les coefficients de variation sont tous nettement inférieurs à 5 %, ce qui signifie que la distribution des rendements est homogène et donc la mesure très répétable.

L'utilisation de ce décortiqueur à riz dans les conditions fixées et les réglages optimisés nous permet d'avoir un test pour le décorticage tout à fait répétable et fiable, afin de mesurer le rendement au décorticage et avoir une idée de l'aptitude au décorticage d'une variété inconnue, ou pour tout simplement décortiquer les grains avant le blanchiment.

Ce test peut néanmoins s'avérer limitatif quand nous avons de grandes quantités à décortiquer pour un grand nombre d'essai. Si le passage en continu n'est pas envisageable à cause de l'échauffement des rouleaux de caoutchouc, on devrait vérifier sa fiabilité sur des patchs de 200 voire 300 g.

II - Optimisation du blanchiment

Avant mon arrivée au laboratoire de l'équipe Qualité des Produits du CIRAD-CA, le blanchisseur à riz Sataké a été adapté au fonio en réduisant la chambre de blanchiment et les orifices de la grille perforée. Après cette première modification la charge maximale de fonio à blanchir était de 250 g pour une durée de 5 min. Pour une caractérisation variétale des fonio des trois pays fournis en petites quantités de 500 g à 1 kg , il n'était pas envisageable de travailler avec des quantités aussi élevées que 250 g. Alors, la capacité de la chambre de blanchiment a été réduite une seconde fois.

II-1 Essais après la seconde réduction de la chambre de blanchiment

Avec cette nouvelle chambre, l'optimisation du blanchiment a consisté à rechercher la charge en grains, la vitesse et la granulométrie de la meule abrasive, et le temps de blanchiment optimum pour avoir un bon blanchiment, en l'occurrence un rendement de l'ordre de 90 % en grains blanchis, un faible taux de brisures (inférieur à 2 %), un bon dégermage, sans présence de sons adhérents ni de grains cargo.
Après évaluation du volume de la chambre et sachant qu'elle doit être remplie à moitié pour permettre à la meule de mieux brasser et user les grains (Equipe Conception des équipements du CIRAD), nous avons estimé qu'une charge autour de 150 g devrait convenir.
Les essais de blanchiment ont démarré sur le vrac Bamako 2000 avec la meule fine (granulométrie n° 46), à la vitesse maximum, et différents temps de blanchiment de 2 à 20 min ont été testés. On constate qu'à partir de 6 - 8 min, l'usure est d'environ 10 % avec un taux de brisures faible mais les résultats ne sont pas satisfaisants en raison d'une présence persistante de grains cargo dans le fonio blanchi (environ 10 – 20 % après coloration de May - Grünwald) et ce, même en augmentant la durée de blanchiment (essais effectués jusqu'à 20 min) (Tableau n° 8).
Au-delà de 12 min, l'usure est constante du fait d'un dépôt de son sur la meule et sur les parois de la grille.
La charge a été réduite à 120 g afin de mieux brasser le grain, mais aucune amélioration concernant la présence de grains cargo n'a été constatée.

La meule abrasive fine n° 46 a été remplacée par une deuxième meule, habituellement utilisée pour le riz (granulométrie n° 36) plus grossière en espérant augmenter le brassage et l'abrasion des grains pour réduire la quantité de grains cargo. Différentes charges et différents temps ont été testés à partir de 150 g. On obtient pour 150 g à 6 - 8 min des rendements équivalents à ceux de la meule fine, avec peu de brisures mais les cargo sont toujours présents. Le passage à 175 g ne donne pas d'amélioration dans la diminution du taux de cargo mais un taux de brisures beaucoup plus élevé (environ 5 % à 12 min) (voir Tableau n°9).

En observant de façon plus précise la grille du blanchisseur pendant le blanchiment, nous avons noté qu'au bout de 3 min les grains de fonio stagnaient au niveau des freins répartis de façon régulière sur la surface interne du grillage et au niveau de la trappe de sortie. Normalement en butant sur ces freins les grains devraient retomber sur la meule, permettant ainsi à toute la charge d'être abrasée. Dans notre cas, le fonio s'agglutinait à ces endroits et n'atteignait pas la meule. Il y avait stagnation de grains non blanchis quelle que soit la granulométrie de la meule, la charge initiale et la durée de blanchiment. En outre, le grillage de 500 µm était trop fin et le pourcentage de vide de la grille de protection de cette meule trop

Tableau n° 8 : Essais avec la meule fine n° 46 (la meule fine) sur le vrac Bamako 2000

Poids des prises d'essai	Durée de blanchiment	Rendement (%)	Taux de brisures (%)
150	2 min	95,7	0,2
150	4 min	92,4	0,3
150	6 min	89,6	0,6
150	8 min	90,3	0,7
150	10 min	86,5	1,1
150	12 min	85,9	1,2
150	20 min	86,5	2,0
120	4 min	95,9	***
120	6 min	93,7	***
120	20 min	85,7	***

Tableau n° 9 : Essais avec la meule n° 36 (la meule grossière) sur le vrac Bamako 2000

Poids des prises d'essai	Durée de blanchiment	Rendement (%)	Taux de brisures (%)
150	4 min	93,2	0,4
150	6 min	90,9	0,6
150	8 min	88,7	0,8
150	10 min	86,4	1,0
150	12 min	85,4	1,3
80	4 min	97,3	0,2
80	6 min	96,2	0,2
80	8 min	95	0,2
80	10 min	93,5	0,4
110	10 min	89,3	0,9
175	10 min	80,3	3,8
175	12 min	79,1	5,4

faible ; par conséquent, les sons n'étaient pas évacués et restaient accumulés sur la grille et dans le fonio blanchi.

II- 2 Essais après les nouvelles modifications

Suite à ces constatations, plusieurs modifications ont été apportées au blanchisseur par les machinistes, à savoir :

- le remplacement du grillage de 500 µm par un autre avec des mailles de 650 µm de diamètre tout en augmentant le pourcentage de vide de la grille extérieure pour favoriser l'évacuation des sons ;
- la suppression des freins et la réduction de la chambre de blanchiment de moitié pour favoriser l'interaction entre les grains et pour que la masse soit mieux entraînée (la distance entre la grille et la meule serait de 4 mm au lieu de 8 mm) ;
- la suppression de la trappe de sortie : il faut donc ouvrir la chambre pour sortir les grains après blanchiment et les sons sont recueillis par le récipient de collecte qui était préalablement destiné à recevoir les grains blanchis.

Les premiers essais après ces modifications ont démarré sur le même vrac Bamako 2000 avec la meule fine n° 46, à la vitesse maximale. Une charge de 60 g a été fixée dès le départ en fonction du volume de la nouvelle chambre. Des temps de 3 min, 1 min 30 et 1 min ont été testés et nous avons constaté un bon blanchiment avec peu de cargo mais une usure excessive des grains au-delà de 50 %.

La vitesse minimale a été alors testée sur des charges de 50, 60 et 70 g à des durées de 1, 2 et 3 min, avec la meule n° 46 (fine) pour voir si les grains étaient bien blanchis sans être trop usés. Nous avons constaté un rendement correct (85-90 %) et après coloration, un blanchiment satisfaisant (peu de cargo) mais pas de dégermage des grains. Les résultats sont comparables quelle que soit la charge de grains testée et finalement la charge de 60 g a été retenue pour la suite des essais (voir Tableau n° 10).

Les quatre vitesses possibles ont été ensuite testées pour voir leur effet à différents temps, sur le rendement et le taux de brisures des grains blanchis. Après coloration, nous avons remarqué visuellement que :

- la vitesse maximale permet un bon dégermage mais fait chuter les rendements à 60 % environ,
- la vitesse minimale donne les rendements attendus (environ 10 %) mais ne permet pas d'ôter le germe,
- et les deux vitesses intermédiaires (moyennes 1 et 2) donnent des résultats intermédiaires, à savoir un léger dégermage et une usure d'environ 15 à 30 % de la prise initiale (voir Tableau n° 11).

Pour vérifier nos résultats, nous avons évalué la teneur en lipides et en matières minérales de ces différents échantillons. En effet, l'essentiel des lipides du grain est concentré dans le germe tandis que les matières minérales se localisent principalement dans les couches périphériques, notamment dans la couche à aleurone. La teneur en lipides permet donc de quantifier le dégermage, et le taux de cendres quant à lui donne une estimation de l'usure du grain.

Les taux de lipides et de cendres des échantillons de fonio blanchis pendant 2 min à ces 4 vitesses confirment les résultats précédents : par rapport au grain cargo de ce vrac Bamako

Tableau n° 10 : Blanchiment du vrac Bamako 2000 à la vitesse minimale et avec la meule fine (n° 46)

Poids des prises d'essai	Durée de blanchiment	Rendement au blanchiment (%)	Taux de brisures (%)
50	2 min	92,3	0,2
60	1 min	93,9	0,2
60	2 min	92,4	0,2
60	3 min	87,7	0,3
70	2 min	88,9	0,2

Tableau n° 11 : Rendement, taux de brisures, teneur en lipides et en cendres du vrac Bamako 2000 en fonction de la vitesse de la meule fine (n° 46)

Vitesse de blanchiment	Durée de blanchiment	Rendement au blanchiment (%)	Taux de brisures (%)	Teneur en lipides (% m.s.)	Teneur en matières minérales (% m.s.)
minimale	2 min	86	0,3	1,7	0,6
moyenne 1	2 min	85,4	0,4	1,4	0,5
moyenne 2	2 min	69,8	1,9	0,6	0,3
maximum	2 min	62,3	4,1	0,6	0,2

2000 dont la teneur en lipides et en cendres avoisinent respectivement 3,8 et 1 % m.s., nous pouvons observer que :

- la vitesse maximale donne des taux de lipides (0,6 % m.s.) proches de ceux des produits blanchis au pilon (0,8 % m.s.) ; la teneur en matières minérales des échantillons blanchis à cette vitesse ne représente que 20 % du taux de matières minérales des grains cargo (0,2 % m.s.), chiffre nettement inférieur à ce qui est retrouvé traditionnellement (0,5 % m.s.).
- à la vitesse minimale, le dégermage est très faible (1,7 % m.s. de lipides) et la teneur en matières minérales est de 0,6 % m.s. pour une usure de 14 %.
- la vitesse moyenne 1 donne des taux de lipides et de cendres de 1,4 % et 0,5 % m.s. respectivement pour une usure pratiquement identique à celle obtenue à la vitesse minimale, environ 15 %.
- la vitesse moyenne 2 donne des résultats similaires à ceux de la vitesse maximale pour une usure d'environ 30 % (taux de lipides et de cendres : 0,6 et 0,3 % m.s. respectivement) (voir Tableau n° 11).

Compte tenu des résultats qui montrent un dégermage satisfaisant mais une usure excessive après 2 min aux vitesses moyenne 2 et maximale, nous avons entamé de nouveaux tests à ces deux vitesses en réduisant la durée de blanchiment à 1 min, 45 et 30 sec dans le but de rechercher la durée qui nous permettra d'user environ 10 à 13 % des grains tout en dégermant au mieux (voir Tableau n°12).

Après une minute de blanchiment, nous avons obtenu un rendement de 81.3 et 81.9 % (c'est à dire une usure d'environ 18 %) et une teneur en lipides de 1,2 % m.s. et 1.3 % m.s. aux vitesses maximale et moyenne 2.

A 45 sec, nous avons obtenu un taux d'usure acceptable de 12 % à la vitesse moyenne 2 (ce qui n'est pas le cas à la vitesse maximale, 17 %) sans pour autant mieux dégermer le grain (1,5 % m.s. de lipides).

A 30 sec, pour les deux vitesses testées, les échantillons sont peu homogènes car la durée de blanchiment est trop courte.

Pour voir le comportement au blanchiment d'un autre fonio dans les mêmes conditions opératoires, nous avons testé les mêmes durées et les mêmes vitesses de blanchiment sur le second vrac Fingoloni 2001 (1 min, 45 et 30 sec aux vitesses moyenne 2 et maximale). A l'analyse des résultats nous constatons que :

Quelles que soient la vitesse ou la durée testées, ce vrac contient moins de brisures que le premier, les rendements et les taux de lipides sont légèrement plus élevés. Ce vrac semble donc être plus dur que le vrac Bamako 2000.

Après 45 secondes de blanchiment, les taux d'usure recherchés sont atteints aux vitesses moyenne 2 et maximale et on dégerme à moitié (voir Tableau n° 13).

Finalement, nous arrivons à des conditions de dégermage équivalentes (environ 1,5 % m.s. de lipides) pour ces 4 vitesses :

- la vitesse minimale pendant 2 min,
- la vitesse moyenne 1 pendant 2 min,
- la vitesse moyenne 2 pendant 45 sec,
- et la vitesse maximale pendant 30 sec,

mais seule le temps de 45 sec à la vitesse moyenne 2 nous permet de nous limiter dans une usure de 10 – 12 %. Nous décidons donc de blanchir toutes les variétés à la vitesse moyenne 2 pendant 45 sec.

Au terme de ces essais de mise au point du blanchiment, nous avons conscience des limites de cette machine qui en utilisant le système d'abrasion ne permet pas d'ôter le germe comme peut le faire le pilon, et d'autres modifications sont prévues pour améliorer le dégermage.

Tableau n° 12 : Rendement, taux de brisures et teneur en lipides du vrac Bamako 2000 aux vitesses maximale et moyenne 2 de la meule fine

Vitesse de blanchiment	Durée de blanchiment	Rendement au blanchiment (%)	Taux de brisures (%)	Teneur en lipides (% m.s.)
maximale	1 min.	81,3	1,0	1,2
	45 sec.	82,6	0,9	1,2
	30 sec.	87,4	0,5	1,6
moyenne 2	1 min.	81,9	0,7	1,3
	45 sec.	87,9	0,4	1,5
	30 sec.	91	0,2	1,9

Tableau n° 13 : Rendement, taux de brisures, teneur en lipides et cendres du vrac Fingoloni 2001 aux vitesses maximale et moyenne 2

Vitesse de blanchiment	Durée de blanchiment	Rendement au blanchiment (%)	Taux de brisures (%)	Teneur en lipides (% m.s.)	Teneur en matières minérales (% m.s.)
maximale	1 min.	82,9	0,4	1,2	0,3
	45 sec.	85,5	0,4	1,5	0,4
	30 sec.	88,4	0,3	1,8	0,5
moyenne 2	1 min.	87,2	0,3	1,6	0,5
	45 sec.	88,4	0,2	1,7	0,5
	30 sec.	91,4	0,2	1,9	0,5

III - Optimisation du protocole de cuisson

Le but est de non seulement déterminer la durée de chacune des trois cuissons à la vapeur mais aussi d'évaluer les quantités d'eau à ajouter dans le produit cru avant et pendant la cuisson, pour obtenir un produit bien cuit proche du produit traditionnel. Pour aboutir à cet objectif, nous nous sommes basés sur notre connaissance des méthodes traditionnelles de cuisson en milieu villageois (3 cuissons à la vapeur d'environ 10 –15 min chacune) et sur notre expérience personnelle.

Par ailleurs, il était indispensable de développer une méthode sur une petite quantité de grains. Cependant cette quantité devait être suffisante pour remplir la cellule d'extrusion et avoir ainsi une aire sous la courbe plus représentative pour la lecture de la mesure. Sachant que 20 g de couscous sec suffisent à remplir après cuisson cette cellule (études antérieures au laboratoire de Qualité des Produits) et que nous souhaitions réaliser trois mesures de texture, les essais de cuisson ont été faits sur 60 g de fonio cru.

Du vrac Bamako 2000 issu de nos essais de mise au point du blanchisseur a été utilisé dans un premier temps pour optimiser le protocole de cuisson. Ces grains, après blanchiment, ont été lavés pour enlever les sons résiduels, et séchés jusqu'à atteindre une teneur en eau de 10 – 12 %. En se basant sur la méthode traditionnelle, trois cuissons à la vapeur de 15 min chacune ont été effectuées sur 60 g de ce fonio sec. Contrairement au milieu villageois, où le fonio est immédiatement cuit après lavage et essorage, ce grain trop sec pour être bien cuit (12,2 % d'humidité) a dû être réhydraté : avant la première cuisson, une quantité de 18 ml d'eau distillée a été ajoutée et le grain laissé au repos pendant 10 min. La même quantité d'eau a été systématiquement ajoutée avant la deuxième et la troisième cuisson. Le produit cuit obtenu s'est avéré trop collant et de consistance molle.

Un deuxième essai a alors été effectué en réduisant les temps de cuisson à 10 min et les quantités d'eau distillée à ajouter avant la deuxième et la troisième cuisson, à 12 ml. La réhydratation avec 18 ml et le temps de repos avant la première cuisson ont été maintenus. Après les trois cuissons, ce fonio nous est apparu trop ferme et peu gonflé. Compte tenu de l'hétérogénéité de la matière première issue de nos essais de blanchiment (grand nombre de grains cargo), ces conditions ont été reconduites sur une nouvelle matière première plus homogène, un fonio blanchi et lavé traditionnellement par Mme Soumaré au Mali. En appliquant le même protocole, ce fonio nous est apparu non cuit : par l'écrasement de quelques grains entre deux plaques de verre, nous avons pu vérifier la présence d'une ligne blanche au centre du grain qui montre une gélatinisation incomplète. Les quantités d'eau nécessaires à l'humidification de ce fonio et les temps de cuisson lors du second essai, n'étaient donc pas adaptés.

A chaque étape, les quantités d'eau nécessaire et la durée des deux premières cuissons, ont pu être précisées sur un ressenti visuel et tactile. Les grains ont été réhydratés petit à petit avant chaque cuisson en utilisant une éprouvette graduée de 100 ml. D'autre part, la fin de la dernière cuisson a été jugée par le test de gélatinisation et la durée totale des 3 cuissons répartie de façon homogène. Finalement, les quantités d'eau à ajouter sont les mêmes que celles du premier essai (fonio trop cuit) pour un temps plus court et sont supérieures à celles du deuxième pour un temps légèrement plus long. Cette réhydratation aboutit à un grain à 100 % d'humidité (60 ml d'eau pour 60 g de grains secs).

Le protocole définitif, à l'issu de plusieurs tests d'affilée, est le suivant :
pour 60 g de fonio cru lavé et séché,

- le couscoussier est rempli par 1.5 l d'eau distillée et posé sur une plaque chauffante réglée à 300°C ;
- le fonio est réhydraté avec 18 ml d'eau millipore dans une barquette et laissé reposer pendant 10 min ; il est étalé sur le linge en coton préalablement mouillé avec 3 ml d'eau millipore,
- après émottage, cette même quantité d'eau a été utilisée pour humidifier les grains avant la deuxième et la troisième cuisson. Les temps de cuisson ont été fixés à 10 min pour la première, 12 min pour la deuxième et 10 min pour la troisième.

IV - Optimisation du protocole de mesure de la consistance du fonio cuit

L'objectif à atteindre était d'obtenir une répétabilité entre les 2 à 3 mesures de texture du produit issu d'un essai de cuisson et entre les textures des produits issus des 2 à 3 essais de cuisson réalisés à partir d'une même variété. Un essai de cuisson inclus les trois cuissons successives à la vapeur (voir protocole ci-dessus) pour aboutir au produit final cuit.

La température du produit cuit, le délai entre la cuisson et la mesure ont été testés afin de déterminer les conditions pour une meilleure répétabilité des mesures. Ensuite la grille d'extrusion permettant d'avoir un palier d'extrusion plus constant a été déterminée. La matière première utilisée est le fonio blanchi traditionnellement par Mme Soumaré au Mali.

IV - 1 Choix de la température et du délai

La texture d'un produit dépend de la température. Pendant la cuisson, l'amidon est gélatinisé, il gélifie en cours de refroidissement et rétrograde en cours de stockage. Pour avoir une répétabilité, les mesures ont été faites soit immédiatement après cuisson (fin de gélatinisation) soit en cours de refroidissement (phase de gélification).

IV – 1 – 1 Mesure de texture immédiatement après cuisson

La mise au point des essais de texture à chaud a consisté à maintenir la température du produit cuit autour de 80°C, pendant les deux à trois mesures à l'Instron. La grille d'extrusion testée est celle habituellement utilisée pour le riz (grille n° 1).
Immédiatement après la troisième cuisson, le piston, la cellule et la grille d'extrusion sont préchauffés dans un bain d'eau bouillante et une partie du fonio est transférée pour remplir la cellule d'extrusion pour la première mesure de texture. Parmi les quatre valeurs calculées, seule la force moyenne d'extrusion (exprimée en kgf) a été considérée dans un premier temps. En attendant les autres mesures, le fonio cuit reste dans la passoire, enveloppé dans le linge en coton pour le maintenir chaud. Plusieurs cas ont été testés (voir Tableau n°14) :

Essai 1 : la passoire contenant le fonio cuit est directement posée sur la paillasse (sans eau chaude en dessous). Dans ce cas, la force d'extrusion passe de 15,8 kgf pour la première mesure, à 24,8 kgf pour la deuxième montrant une augmentation de la fermeté due certainement à un refroidissement entre les deux premières mesures. Nous n'avons pas jugé nécessaire de faire la troisième mesure.

Essai 2 : le fonio est maintenu dans le couscoussier contenant l'eau chaude et laissé sous la hotte à côté de la plaque éteinte. Nous avons pu constater une légère augmentation de la fermeté pour la deuxième et la troisième mesure, la valeur des forces d'extrusion sont : 14,9 - 17,9 et 17,4 kgf.

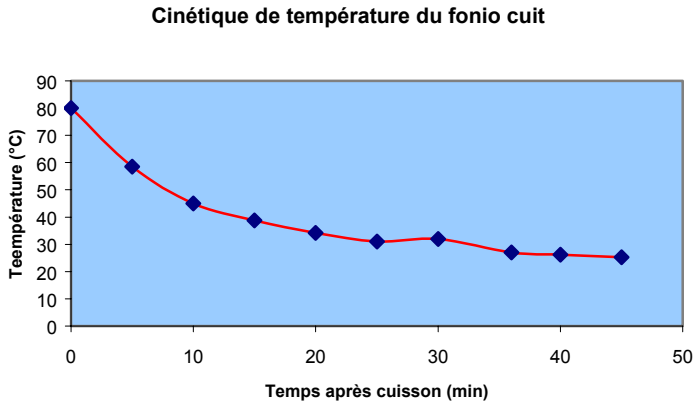
Essai 3 : cet essai a été reconduit pour voir si en étant plus rapide dans les gestes, nous pouvions réduire le refroidissement entre la première et la deuxième mesure. Nous avons constaté que les forces d'extrusion pour les trois mesures sont globalement plus faibles (12,8 - 12,9 et 14,3 kgf), comme si le produit était plus chaud notamment pour la première mesure effectuée immédiatement après cuisson. Le fonio ne refroidit pas entre la première et la deuxième mesure mais légèrement entre la deuxième et la troisième (force d'extrusion plus élevée 14,3 kgf pour la troisième mesure).
Pour être plus homogène et limiter le refroidissement entre ces mesures, nous avons décidé de maintenir le couscoussier sur la plaque éteinte.

Essai 4. Lorsque le fonio cuit reste dans le couscoussier sur la plaque éteinte, les forces moyennes relevées sont 11,8 - 10,6 et 10,5 kgf. Nous avons constaté une meilleure répétabilité entre les mesures au sein de l'essai. Cependant, la première valeur diffère d'un essai à l'autre du fait de l'instabilité de la texture du produit fortement liée à la température.

A l'issu de tous ces résultats (voir Tableau n°14), nous avons remarqué une variation de texture d'un essai à l'autre et notamment en ce qui concerne la première mesure de texture même si le produit est immédiatement transféré dans la cellule après les trois cuissons. Sa valeur varie de 11,8 à 15,8 kgf et dépend du délai entre la troisième cuisson et la première mesure de texture et par ricochet de l'opérateur, elle est donc très aléatoire. Même si nous sommes arrivés à maintenir une température et une texture constante entre les mesures, il y a une trop grande variation d'un essai de cuisson à l'autre. D'où la nécessité d'effectuer une cinétique de température après la troisième cuisson, pour savoir à partir de quel moment la température du produit se stabilisait et permettrait des mesures constantes.

IV – 1 – 2 Mesure de texture 30 minutes après cuisson

Après les 3 cuissons à la vapeur selon le même protocole que pour les essais de texture à chaud, le fonio est laissé dans la passoire posée au-dessus d'un grand bécher en verre, sous la hotte, près de la plaque chauffante à 300° C.



Une cinétique de température a été établie (voir courbe ci-dessus).

Tableau n° 14 : Mesures de texture du fonio effectuées immédiatemment après la cuisson

Mesure de forces d'extrusion (kgf)	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
1	15,8	14,9	12,8	11,8
2	24,8	17,9	12,9	10,6
3	NR	17,4	14,3	10,5
Moyenne par essai		16,7	11	13,4
Moyenne générale		13,2		
Ecart type		2,7		
Coefficient de variation		19,7		

NR = non réalisé

Tableau n° 15 : Mesures de texture du fonio effectuées 30 minutes après la cuisson

Mesure de forces d'extrusion (kgf)	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
	Force	T°C	Force	T°C	Force	T°C	Force	T°C
1	22,8	33	19,5	32	21,8	34	31,5	32
2	18,9	33	23,4	26	27,1	31	30,5	31
3	18	29	26,2	25	28,3	28	22,1	29
Moyenne par essai	19,9		23,0		25,7		28,0	
Moyenne générale	24,2							
Ecart type	4,5							
Coefficient de variation	18,6							

D'après la courbe, la température du produit commence à se stabiliser après 20 min de cuisson et on atteint un palier. Nous avons donc décidé de mesurer la texture à partir de 30 min après la cuisson pour amoindrir l'effet de la température sur la consistance du produit (voir Tableau n°15).

Pour l'essai de cuisson n° 1,

- la première mesure de texture a été faite 30 min après la cuisson à 33°C,
- la deuxième, 37 min après la cuisson à la même température,
- la troisième a été faite 44 min après la cuisson à 29°C.

On remarque un ramollissement de la texture entre la première (22,8 kgf) et les deux autres mesures : 18,9 et 18 kgf, alors que la température est sensiblement la même entre les mesures.

Le second essai a été fait dans les mêmes conditions que le premier mais la passoire a été mise cette fois-ci sur la paillasse au milieu de la salle pour que le fonio soit à la température ambiante.

- la première mesure de texture a été faite à 30 min à 32°C
- la deuxième à 40 min à 26°C
- la troisième : à 48 min à 25°C

Dans ces conditions, nous remarquons que la température diminue légèrement pour des forces d'extrusion qui augmentent au cours du refroidissement (19,5 - 23,4 – 26,2 kgf).

Pour les essais 3 et 4 faits dans les mêmes conditions que pour l'essai n° 1, nous avons constaté une légère diminution de la température et des mesures de texture variables. Les forces d'extrusion sont respectivement de : 21,8 - 27,1 - 28,3 kgf pour l'essai 3 et de 31,5 - 30,5 - 22,1 kgf pour l'essai (voir Tableau n°15).

Au terme de ces essais, nous pouvons dire que même si la température atteint un palier après 20 min (avec de légères fluctuations), la texture du fonio continue à évoluer dans le temps et elle diffère d'un essai à l'autre. Les prochains essais seront donc effectués 1 h après cuisson pour essayer d'avoir une texture plus stable.

IV – 1 – 3 Essais effectués une heure après cuisson

Les essais 5 et 6 ont été effectués dans les mêmes conditions que précédemment mais la texture a été mesurée une heure après cuisson.
La température est plus stable et nous constatons une bonne répétabilité entre les mesures à l'intérieur d'un essai mais des différences d'un essai à l'autre (essai 5 : 29,3 - 27 et 28,2 kgf). De plus, le produit est très soumis aux conditions ambiantes du laboratoire. Par exemple, pour l'essai 6 (forces d'extrusion : 33,9 - 34 et 32,4 kgf) du fait de l'absence de climatisation et d'un temps plus sec et chaud, les forces d'extrusion sont plus élevées que celles de l'essai 5 (voir Tableau n°16).

Pour le maintenir dans une atmosphère stable et standardisée pendant une heure au repos, le fonio cuit a été réparti dans 3 boîtes fermées (la quantité de fonio dans chaque boîte doit permettre de remplir la cellule d'extrusion pour une mesure à l'Instron), laissées à la température ambiante pendant 10 min pour permettre au produit de refroidir rapidement, avant d'être mises à l'étuve à 35°C pendant les 50 autres minutes.

Tableau n° 16 : Mesures de texture du fonio effectuées une heure après la

Mesure de forces d'extrusion (kgf)	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Essai 9	Essai 10
1	29,3	33,9	28,6	23,9	28,6	28,6
2	27	34	29,6	27,2	28	23,7
3	28,2	32,4	27,2	30,2	26,2	33
Moyenne par essai	28,2	33,4	28,5	27,1	27,6	28,4
Moyenne générale			27,9			
Ecart type			2,2			
Coefficient de variation			8,0			

Ce protocole a été appliqué aux essais 7, 8, 9 et 10. On constate que les mesures de texture sont répétables à l'intérieur d'un essai pour chacun des essais et même d'un essai à l'autre. Même si 3 valeurs se détachent de ± 5 kgf, le coefficient de variation pour l'ensemble des douze mesures (9,2 %) ne dépasse pas 10 %. Il est nettement inférieur à celui trouvé pour les essais sur produit chaud (19,7 %) et également à celui pour les essais réalisés 30 min après cuisson (voir Tableau n° 16).

IV – 2 Choix de la grille d'extrusion

Plusieurs grilles d'extrusion ont été testées :
- la grille n° 1 avec des trous de 6 mm de diamètre
- la grille n° 2 avec des trous de 4 mm de diamètre
- la grille n° 3 avec des trous de 2,5 mm de diamètre
- la grille n° 4 avec des trous de 2 mm de diamètre

Tous les essais précédents ont été réalisés, avec la grille d'extrusion n° 1 habituellement utilisée pour le riz. Compte tenu du diamètre des trous et de la petite taille des grains de fonio même gonflés après cuisson, il n'y avait pas de réelle extrusion du produit, ce qui explique un palier non horizontal.
L'utilisation de la grille n° 2 n'a pas donné de meilleurs résultats. Par contre, les grilles 3 et 4 ont permis une extrusion plus approfondie : le produit est vraiment forcé au travers de la grille et ressort sous forme de boudin d'où des forces d'extrusion plus régulières. Finalement la grille n° 4 a été retenue pour la suite du travail.

IV – 3 Essais de reproductibilité

Le protocole de cuisson a été appliqué aux deux vracs et aux 5 variétés de Guinée blanchis au blanchisseur de laboratoire Sataké ainsi qu'au vrac Fingoloni 2001 blanchi à la GMF et par Mme Soumaré. Les mesures de consistance et de gonflement du fonio cuit ont été analysées statistiquement en effectuant une analyse de variance avec le Test de Newman – Keuls.

Sur tous ces produits cuits dans les mêmes conditions, nous n'avons décelé aucun effet cuisson (au seuil 5 %) par l'analyse statistique, ce qui montre une très bonne reproductibilité du protocole de cuisson établi antérieurement.

EFFET DU BLANCHIMENT

ET

COMPARAISON VARIETALE

INFLUENCE DU BLANCHIMENT

I - Comparaison du blanchiment traditionnel et du blanchiment mécanique

Cette étude a été faite dans le but de :

1) savoir si les produits issus du décortiqueur – blanchisseur GMF (réalisé dans le cadre du projet) et ceux issus du blanchisseur de laboratoire étaient comparables aux produits traditionnels, au point de vue qualité de blanchiment (taux de brisures et dégermage) ; et si non quelles étaient les conséquences sur la qualité culinaire.

2) savoir si le fonio blanchi par la GMF était proche du fonio blanchi traditionnellement sur le plan qualité culinaire. D'après, les enquêtes de consommation, les premiers critères de qualité du fonio sont le gonflement (le volume double ou triple après cuisson) et la consistance moelleuse.

Par ailleurs au niveau du laboratoire, il est important d'avoir un équipement qui nous donne des produits ayant des qualités de blanchiment et culinaire proches du produit traditionnel pour une comparaison variétale.

Pour mettre en évidence ces éventuelles différences, nous avons comparé à partir du même vrac paddy Fingoloni 2001, les rendements, les taux de brisures et de lipides, le gonflement et la fermeté après cuisson des fonio blanchis :

- par Mme Soumaré traditionnellement
- au décortiqueur – blanchisseur GMF du projet fonio
- et au blanchisseur Sataké du laboratoire à des durées d'1 minute et de 45 secondes à la vitesse moyenne 2 (conditions optimales définies lors des essais de mise au point du blanchiment) (voir Tableau n° 17).

Les taux de brisures des fonio blanchis mécaniquement, aussi bien à la GMF qu'au Sataké, sont équivalents pour ce vrac Fingoloni (0,3 %). Par contre, les cinq pilages qui sont traditionnellement effectués pour arriver au fonio bien blanchi, brisent d'avantage les grains (1,9 %).
La teneur en lipides est plus basse dans le fonio blanchi traditionnellement et à la GMF respectivement 0,9 et 1 % m.s.. Par rapport à la teneur en lipides du grain cargo (3,8 % m.s.) le dégermage est donc plus efficace que dans le cas du blanchiment en laboratoire avec des taux de lipides de 1,6 % m.s. après 1 min et 45 sec.
En parallèle, on observe que pour ces deux produits, les taux de gonflement des grains après cuisson (173,1 et 182 g d'eau pour 100 g de fonio cuit) sont plus élevés avec des forces d'extrusion plus basses (42,5 – 38,8 kgf) par rapport au produit du laboratoire.
Ce qui veut dire que les deux produits issus du blanchiment traditionnel et de la GMF ont un dégermage plus poussé, gonflent plus et sont plus moelleux. A l'opposé, le blanchisseur de laboratoire use le grain mais dégerme moins, la quantité d'eau absorbée par le fonio en cours de cuisson est moindre et sa texture plus ferme à la mesure à l'Instron.

Nous faisons les mêmes constatations sur le Bamako 2000 : pour des usures de grains d'environ 18 %, le taux de lipides reste nettement supérieur à 1 % m.s., le produit absorbe moins d'eau que les deux premiers et a une texture plus ferme (voir Tableau n° 18).

Tableau n° 17 : Comparaison du blanchiment traditionnel et mécanique du vrac Fingoloni 2001 et qualité culinaire

Vrac Fingoloni 2001 blanchi	Usure des grains (%)	Taux de brisures (%)	Teneur en lipides (% m.s.)	Gonflement (g d'eau pour 100 g)	Force d'extrusion (kgf)
par Mme Soumaré	10	1,9	0,9	173,1	42,5
par la GMF	10	0,3	1	182	38,8
au Sataké vitesse moyenne 2 1 min.	13	0,3	1,6	158,4	45,9
au Sataké vitesse moyenne 2 45 sec.	11	0,3	1,6	137,1	52,1

Tableau n° 18 : Blanchiment du vrac Bamako 2000 au Sataké de laboratoire et qualité culinaire

Vrac Bamako 2000 blanchi	Usure des grains (%)	Brisures (%)	Lipides (% m.s.)	Gonflement (g d'eau pour 100 g)	Force d'extrusion (kgf)
au CIRAD vitesse moyenne 2 1min.	18	0,7	1,3	138,8	49,2

Il est intéressant de noter que la machine GMF, une adaptation du type Engelberg, (développée dans le cadre du projet CFC) qui utilise le système de friction arrive à bien dégermer le fonio avec des caractéristiques de blanchiment et culinaire proches de celles du produit traditionnel. Ce n'est pas le cas avec le blanchisseur de laboratoire qui use les grains par abrasion. 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.

L'analyse de variance des deux variables gonflement et force d'extrusion sur le vrac Fingoloni 2001 blanchi mécaniquement et traditionnellement, confirme que le fonio issu de la GMF et celui blanchi traditionnellement ont un comportement identique à la cuisson. Ils font partie du même groupe homogène à un seuil de 5 % de signification, mais la texture du fonio de la GMF est plus moelleuse, il gonfle un peu plus et a un taux plus faible en amylose.
Il est difficile de prévoir les préférences des consommateurs vis à vis de ces deux types de produit.

Test de Newman-Keuls

Groupes homogènes de gonflement du fonio cuit
à 5% de signification (test de Fisher : 24,14)

Vrac Fingoloni 2001 blanchi	Moyennes (g d'eau pour 100 g)	Groupes homogènes
par la GMF	182	A
traditionnellement	173	A
en laboratoire	137,1	B

Groupes homogènes de forces d'extrusion du fonio cuit
à 5% de signification (test de Fisher : 35,74)

Vrac Fingoloni 2001 blanchi	Moyennes (kgf)	Groupes homogènes
en laboratoire	52,1	A
traditionnellement	42,5	B
par la GMF	38,7	C

II - Effet du blanchiment progressif

Après avoir constaté le rôle du dégermage sur le gonflement et la texture du produit, il nous a paru intéressant de voir l'impact du blanchiment sur ces deux variables. En effet dans les villages, les femmes ont l'habitude de bien blanchir les grains ce qui sous-entend une usure assez poussée. D'après les enquêtes de consommation, la blancheur est un des premiers critères de qualité du fonio, au même titre que le gonflement et la consistance moelleuse. Cette pratique a des conséquences néfastes sur la qualité nutritionnelle car elle aboutit à un

grain appauvri en matières minérales, en lipides et en protéines. Il nous a alors paru intéressant de voir si une telle usure avait un impact sur la qualité culinaire du fonio et s'il était possible d'arrêter plus tôt les machines pour que les grains conservent un peu plus de nutriments. C'est pour cela qu'au laboratoire nous avons essayé d'obtenir des produits à différents degrés de blanchiment en jouant sur les vitesses du blanchisseur et la durée de blanchiment.

Ces essais ont été réalisés sur le vrac Bamako 2000 et les quatre fonio analysés ont été blanchis à (voir Tableau n° 19) :

- la vitesse minimale pendant 30 sec
- la vitesse minimale pendant 2 min
- la vitesse moyenne 1 pendant 2 min
- la vitesse maximale pendant 2 min

L'usure des grains et le taux de brisures représentent respectivement :

- 5 et 0,17 % à la vitesse minimale pendant 30 sec
- 12,4 et 0,19 % à la vitesse minimale pendant 2 min
- 14,6 et 0,4 % à la vitesse moyenne 1 pendant 2 min
- 37,7 et 4,1 % à la vitesse maximale pendant 2 min

Comme nous l'avons vu précédemment, l'usure des grains et les taux de brisures augmentent inévitablement avec la vitesse et la durée de blanchiment.

Après analyse de la composition chimique et des rendements de ces différents échantillons nous pouvons dire que plus l'usure est poussée, plus le grain est dégermé. En effet nous sommes passés d'un taux de lipides de 2,7 % m.s. à la vitesse minimale 30 sec, à un taux de 0,6 % m.s. à la vitesse maximale 2 min et pour les matières minérales de 0,8 à 0,2 % m.s. respectivement.
Le taux de gonflement le plus bas (environ 135 g d'eau pour 100 g) est retrouvé pour les grains les moins usés présentant les valeurs de lipides et de matières minérales les plus élevés et la consistance de ces produits cuits est plus ferme (48 à 57 kgf). Par contre, quand l'usure est plus poussée et même excessive jusqu'à 40 % d'élimination, cas de la vitesse maximale, les grains de fonio gonflent mieux (151g d'eau pour 100 g) et leur consistance est plus moelleuse (39 à 40 kgf).

Lorsque le grain est bien dégermé et que l'usure est faible (blanchiment traditionnel et la GMF), il gonfle mieux comme si le passage de l'eau vers l'intérieur était favorisé par l'élimination du germe malgré la barrière hydrophobe des protéines concentrées à la périphérie.
Lorsque le grain est peu usé par abrasion (décortiqueur Sataké de laboratoire) mais que le germe est toujours présent, celui-ci constituerait un obstacle à la pénétration de l'eau pendant la cuisson.
Après abrasion excessive par le blanchisseur du laboratoire, lorsque le grain est usé au maximum, le faible taux de lipides ne signifie pas forcément que le germe est arraché comme avec le pilon et que le passage de l'eau est facilité par le scutellum qui est un tissu de transfert. Par contre, l'absorption peut se faire également par la surface du grain compte tenu de la plus faible densité en protéines éliminées lors de l'usure. Dans ce cas, même si le grain gonfle moins que ceux issus du blanchiment traditionnel ou de la GMF, la consistance est relativement proche de celle de ces deux produits. Le grain est enrichi en amidon donc en amylose qui lui confère cette relative fermeté.

Tableau n° 19 : Effet du blanchiment progressif sur le gonflement et la texture du vrac Bamako 2000

Vitesse de blanchiment	Rendement au blanchiment (usure) (%)	Taux de brisures (%)	Teneur en lipides (% m.s.)	Teneur en cendres (% m.s.)	Gonflement du fonio cuit (g d'eau pour 100 g)	Force d'extrusion du fonio cuit (kgf)
minimale 30 sec	95,1 (5)	0,17	2,7	0,8	135,3	48
minimale 2 min	87,6 (12,4)	0,19	1,7	0,6	135,1	57,1
moyenne 1 2 min	85,4 (14,6)	0,4	1,4	0,5	144,9	39,6
maximale 2 min	62,3 (37,7)	4,1	0,6	0,2	151,4	40,3

COMPARAISON VARIETALE

La caractérisation variétale dans les trois pays concernés par le projet CFC est un des objectifs du projet. Cette caractérisation concerne les propriétés physiques, biochimiques, nutritionnelles et culinaires des principales variétés de fonio existantes dans ces trois pays. Le but est d'identifier la ou les variétés qui présentent des caractéristiques technologiques et nutritionnelles plus intéressantes que les autres en vue d'une transformation mécanique à l'échelle artisanale en un produit précuit prêt à être commercialisé.

C'est dans ce cadre que nous avons appliqué le protocole de décorticage, blanchiment, de cuisson et de mesure de texture sur les deux vracs maliens et les cinq variétés guinéennes. Cette étude a donc consisté à comparer le comportement à la cuisson (gonflement et texture) après blanchiment mécanique des deux vracs et des différentes variétés originaires de Guinée. Le blanchiment a été fait dans les mêmes conditions avec le blanchisseur de laboratoire à meule abrasive, à la même vitesse (moyenne 2) et pendant une durée de 45 sec.

- Avant blanchiment, l'analyse des grains cargo montre que (Tableau n° 20) :

- Le taux de matières minérales le plus élevé est retrouvé dans la variété Mbalia (1,5 % m.s.) alors que toutes les autres variétés et les vracs ont une teneur en matières minérales de l'ordre de 1 % m.s à l'exception de la variété Ravé avec 0.7 % m.s. En revanche, tous ces fonio ont approximativement la même teneur en lipides (environ 3,5 % m.s.) avec un taux de lipides légèrement plus bas pour la variété Ravé (3,2 % m.s.) et plus haut pour la variété Kenselen (3.8 % m.s.).
- Le vrac Fingoloni et la variété Mbalia ont une teneur en protéines plus élevée (10,8 et 11,3 % m.s.) viennent ensuite la variété Kenselen avec 10 % m.s. et les autres fonio contenant environ 9,5 % m.s. de protéines.
- La teneur en amylose la plus élevée est retrouvée dans le vrac Fingoloni (27,4 % m.s.), viennent ensuite le vrac Bamako et la variété Mbalia avec respectivement 26,6 et 26,3 % m.s.. Les variétés Kenselen, Siragué, Ravé et Bolefendé ont une teneur en amylose de 25,8 % m.s. chacun.

- Après blanchiment (Tableau n° 21) :

L'usure est équivalente pour les variétés Kenselen, Siragué, Mbalia et Ravé : elle varie entre 13 et 16 %. Par contre, la variété Bolefendé et les deux vracs maliens se détachent avec une usure d'environ 11 % des grains.

Les brisures ou fragments de grains de diamètre compris entre 400 et 500 µm ont des taux supérieurs à 1 % pour les variétés Kenselen et Siragué alors qu'ils sont plus bas et inférieurs à 0,5 % pour les trois autres variétés et les fonio vracs. Après le blanchiment des fonio Mbalia et Ravé, nous avons remarqué 2 à 3 % environ de grosses brisures (de diamètre supérieur à 500 µm).

Nous pouvons conclure que les variétés Mbalia et Ravé à petits grains, ont la même aptitude au blanchiment.
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.

Tableau n° 20 : Composition biochimique des fonio cargo

Variété de Fonio	Teneur en matières minérales (% m.s.)	Teneur en lipides (% m.s.)	Teneur en protéines (% m.s.)	Teneur en amylose (% m.s.)
Vrac Fingoloni 2001	NR	3,6	10,8	27,4
Vrac Bamako 2000	NR	3,5	9,5	26,6
Kenselen	1,0	3,8	10,1	25,8
Siragué	1,0	3,6	9,2	25,8
Bolefendé	0,9	3,4	9,3	25,7
Mbalia	1,5	3,7	11,3	26,3
Ravé	0,7	3,2	9,5	25,8

NR : non réalisé

Tableau n° 21 : Aptitude au blanchiment mécanique en laboratoire des différents fonios

Variétés	Rendement au blanchiment (usure) (%)	Taux de brisures (%)	Teneur en lipides (% m.s.)	Teneur en matières minérales (% m.s.)	Teneur en protéines (% m.s.)	Teneur en amylose (% m.s.)
Vrac Fingoloni 2001	88,4 (11,6)	0,2	1,6	0,5	9,4	28,2
Vrac Bamako 2000	87,9 (12,1)	0,4	1,5	0,5	8,1	28,4
Kenselen	85,8 (14,2)	1,1	1,3	0,3	8,5	28,3
Siragué	84,1 (16)	1,6	1,2	0,4	7,7	27,9
Bolefendé	89 (11)	0,4	1,2	0,4	7,9	26,9
Mbalia	86,6 (13,4)	0,2	1,4	0,6	9,6	26,8
Ravé	84,7 (15,3)	0,5	1,1	0,4	8,2	28,7

L'analyse biochimique des produits blanchis montrent que les taux de lipides et de matières minérales sont superposables pour tous les vracs et variétés : en moyenne 1,2 % m.s. pour les lipides et 0,4 % m.s. pour les cendres. Le dégermage est donc globalement uniforme et l'élimination des partie périphériques équivalente. Les taux de protéines chutent d'environ 1,5 % pour tous ces fonio après blanchiment. Les valeurs d'amylose après blanchiment sont plus élevées pour les variétés Ravé, Kenselen et les vracs maliens avec respectivement 28,7 – 28,3 – 28,4 et 28,2 % m.s. Viennent ensuite la variété Siragué avec 27,9 % et les variétés Mbalia et Bolefendé (26,8 et 26,9 % m.s.) (Tableau n° 22).

A des taux d'usure, de cendres et de lipides équivalents, il se dégage des différences variétales au point de vue qualité culinaire (Tableau n° 22). La variété Siragué et le vrac Fingoloni 2001 se détachent des autres fonio. La première par une capacité de gonflement plus élevé (182,4 g d'eau pour 100 g) et par conséquent une consistance plus moelleuse (force d'extrusion : 31,4 kgf) et le second par une faible capacité de gonflement (137,1 g d'eau pour 100 g) et une texture plus ferme (force d'extrusion : 52,1 kgf). Les autres variétés et le vrac Bamako 2000 ont des taux de gonflement variant de 151,7 à 166,7 g d'eau pour 100 g avec des forces moyennes de l'ordre de 38 kgf. Mais la variété Boléfendé a une consistance légèrement plus ferme que les autres (41,3 kgf).

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.

Groupes homogènes du taux de gonflement (g d'eau pour 100 g) à 5 % de significativité (probabilité : 0 % - test de Fisher : 15,5)

Fonio	**Moyennes**	**Groupes homogènes**
Siragué	182,4	A
Kenselen	166,8	B
Bolefendé	162,9	B C
Vrac Bamako 2000	162,7	B C
Mbalia	156,5	B C
Ravé	151,6	C
Vrac Fingoloni 2001	137,1	D

Groupes homogènes de la force d'extrusion (kgf) à 5 % de significativité (probabilité : 0 % - test de Fisher : 110,85)

Fonio	**Moyennes**	**Groupes homogènes**
Vrac Bamako 2000	52,1	A
Vrac Fingoloni 2001	47,6	B
Bolefendé	41,3	C
Ravé	38,4	D
Mbalia	38,3	D
Kenselen	38,3	D
Siragué	31,4	E

Tableau n° 22 : Qualité culinaire des différents fonios

Variétés	Degré d'usure (%)	Taux de brisures (%)	Teneur en lipides (% m.s.)	Teneur en matières minérales (% m.s.)	Gonflement (g d'eau pour 100 g)	Force d'extrusion (kgf)
Vrac Fingoloni 2001	88,4 (11,6)	0,2	1,7	0,5	137,1	52,1
Vrac Bamako 2000	87,9 (12,1)	0,4	1,5	0,5	162,7	47,6
Kenselen	85,8 (14,2)	1,1	1,3	0,3	166,8	38,3
Siragué	84,1 (16)	1,6	1,2	0,4	182,4	31,4
Bolefendé	89 (11)	0,4	1,2	0,4	162,9	41,3
Mbalia	86,6 (13,4)	0,2	1,4	0,6	156,5	38,3
Ravé	84,7 (15,3)	0,5	1,1	0,4	151,7	38,4

Nous pouvons donc affirmer que la variété Siragué est celle qui gonfle le plus et par conséquent la plus moelleuse. La variété Boléfendé est la plus ferme même si elle gonfle autant que la variété Mbalia et le vrac Bamako 2000.

Même si selon ces analyses de variance, il semble se dessiner une tendance « la variété qui gonfle est plus moelleuse » il n'y a pas de corrélation significative à 5% entre le gonflement et la texture du produit ; le coefficient de corrélation est inférieur au seuil à 5 % dans la table de corrélation.
Il n'y a pas non plus de corrélation significative entre le gonflement, la fermeté et les caractéristiques technologiques du grains (seuil 5 %).

Cette variété Siragué qui après notre comparaison, se différencie des autres est celle qui est justement appréciée par les consommateurs guinéens (Cruz et coll.). Notre protocole de mesure de texture est donc fiable. Mais nous ne pouvons pas conclure d'emblée car la comparaison ne concerne qu'un éventail de cinq variétés de fonio. Il est prévu d'élargir cette étude à un nombre nettement plus grand de variétés aussi bien guinéennes, maliennes que burkinabé. En outre, l'analyse de la qualité nutritionnelle sera complétée plus tard.

CONCLUSION

Lors de ce stage effectué dans le cadre du projet fonio, mon rôle était en premier lieu de caractériser plusieurs variétés de fonio au point de vue aptitude au décorticage- blanchiment et qualité culinaire et d'analyser ensuite la qualité culinaire des produits issus de la transformation traditionnelle et ceux provenant de la transformation mécanisée.
Pour atteindre ces objectifs, nous avons dû optimiser le décorticage et le blanchiment de laboratoire, standardiser une méthode de cuisson, développer une méthode d'évaluation de la qualité culinaire du fonio. Les enquêtes de consommation sur le fonio ont révélé que les premiers critères de choix de cette céréale sont la blancheur, l'absence de sable, le gonflement et la consistance moelleuse. La méthode d'évaluation de la qualité culinaire du fonio a donc porté sur la mise au point d'une méthode de mesure de ces deux paramètres que sont le gonflement et la consistance du fonio cuit. Ces méthodes devaient être répétables, reproductibles et appliquées sur de petites quantités de grains.

Etant donné qu'il n'existe pas encore de machine spécialement conçue pour le fonio, avec l'aide des machinistes, nous avons dû adapter à cette céréale des équipements de laboratoire habituellement utilisés pour le riz.
Le décorticage a été réalisé avec un décortiqueur de laboratoire et de marque Sataké. Le test de décorticage développé sur des quantités de 100g de fonio paddy s'est avéré efficace sur toutes les variétés de fonio que nous avons analysées.

Le blanchiment a été fait grâce à un blanchisseur à meule Sataké qui fonctionne par un système d'abrasion. Après plusieurs modifications, nous avons conclu que l'abrasion ne permet pas d'ôter le germe comme le fait le pilon traditionnellement et le décortiqueur – blanchisseur GMF, créé dans le cadre du projet fonio.

Nous avons pu standardiser une méthode de cuisson proche autant que possible des pratiques traditionnelles et la mesure de consistance du fonio cuit a pu également être répétable et reproductible.

Nous pouvons conclure au bout de cette étude, que les produits issus de la transformation avec le décortiqueur – blanchisseur GMF, créé dans le cadre du projet, peuvent être compétitifs sur les marchés. En comparaison avec le fonio transformé traditionnellement, cette machine permet d'avoir un produit fini qui réunit 3 critères de choix de cette céréale ; à savoir la blancheur, le gonflement et la consistance moelleuse. De nouveaux équipements tel que le dessableur, sont en cours d'expérimentation au CIRAD pour éliminer la grande quantité de sable retrouvée dans le produit fini.

De toutes les variétés de fonio testées, c'est la variété Siragué provenant de guinée qui réunit selon notre protocole d'étude, les critères de qualité souhaités par les consommateurs. Et c'est justement une variété très appréciée en Guinée. Mais elle est légèrement plus pauvre en protéines pour des valeurs de lipides, de matières minérales et d'amylose équivalentes à celles des autres céréales.

Au terme de ce stage, nous pouvons dire que nous avons pu remplir nos objectifs à part le fait que le blanchisseur dont dispose le laboratoire ne permet pas de dégermer les grains de fonio comparé au pilon et à la GMF. D'autres modifications sont prévues pour améliorer le dégermage.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE SUR L'ETUDE DU FONIO

1- PORTERES R. 1955. Les céréales mineurs du genre *Digitaria* en AFRIQUE et en Europe. Journal d'agriculture tropicale et de botanique appliquée, Tll n°7-8-9. France. Pp 351-675

2- National academy press. 1996. Lost crops of Africa. Vol. 1. Grains. National Research concil. Washington, D. C. USA.

3- DE LUMEN B. O., BECKER R. AND REYES P. S. 1986. Legumes and a cereal with high methionine-cystéine contents. J Agric Food Chem, 34(2) : 361-364.

4- CRUZ J.F., DRAME D., DIALLO T., SON G. 2000. Projet CFC/IGG : Amélioration des technologies post-récoltes du fonio. Rapport annuel. IER, IRAG, IRSAT, CIRAD. Bamako, Mali. 36 pages +annexes

5- BOUDILLAT F. 1995. Les voies d'amélioration du fonio dans les plaines de Timbi. Mémoire de fin d'études ISTOM. IREG. Guinée

6- CARBIENER R., JAEGER P., BUSSON F. 1960. Etude de la fraction protidique de la graine de fonio (*digitaria exilis* kippist Stapf) : une protéine exceptionnellement riche en méthionine. *Annale de la Nutrition et de l'alimentation* 14 : 165-169.

7- RICO V. 2000. Valorisation et intérêt nutritionnel du fonio au Mali. DESS Nutrition et alimentation en PVD – Université de Montpellier II. IER/CIRAD. Bamako. Mali. Octobre 2000. 60p + annexes.

8- CRUZ J.F., DRAME D., THAUNAY P. 2000. Projet CFC/IGG – (FIGG/02) : Amélioration des technologies post-récoltes du fonio. CIRAD-IER-IRAG-IRSAT. Essais des équipements de transformation au Mali. Rapport intermédiaire n°1-7/100. IER, CIRAD Bamako. Mali. 14p + annexes

9- MAROUZE C., BUFFETAUD B. 2000. Projet CFC/IGG. Etude du lavage du fonio. Etude des principes permettant une mécanisation des opérations. CIRAD-AMIS, n°64/00. Montpellier. France. Novembre 2000. 15p.

10- SANOGO M. Bulletin du réseau TPA n°10- Juin 1995 : Le décorticage, vrai goulot d'étranglement de la transformation.

11- SACKO S. LOUA F. DIALLO T.A., KOUYATE S. 2000. Projet CFC/IGG. Technologies post-récoltes du fonio en Guinée. IRAG. Bareng. Guinée

12- TROUDE F., MAROUZE C., CRUZ J.F. 2000. Rapport de la réunion « équipements » de Bamako. Projet CFC/IGG (FIGG/02). Amélioration des technologies post-récoltes du fonio. CIRAD. Bamako. Mali. Décembre 2000. 10p + annexes

13- BESANCON S. 2000. Etude de la consommation de fonio dans le traitement du diabète sucré au Mali. DESS de nutrition et alimentation en PVD – Université de Montpellier II. CIRAD. Bamako. Mali. Octobre 2000. 74p + annexes.

14- BUI-PHONG F. 1998. Le fonio une plante à part. Caractérisation technologique, physico-chimique et histologique des grains de plusieurs variétés. *Mémoire de fin d'études du 21 septembre 1998.*

15- HAQ N., OGBE F. DANIA 1995. Fonio (*Digitaria exilis and D iburua*). « *Cereals and pseudocereals » Edité par J. T Williams. 1995*. P. 225-245.

16- SARTELET H., SERGHAT S., LOBSTEIN A. 1996. Flavonoids extracted from fonio millet (*digitaria exilis*) reveal potent antithyroid properties.

17- FLIEDEL G., BERTHE A., OUATTARA L. 2001 Projet CFC/IGG – (FIGG/02) : Amélioration des technologies post-récoltes du fonio. CIRAD-IER-IRAG-IRSAT Activité n°4 : Analyse des caractéristiques technologiques. 25 p+ annexes.

18- ROSSIGNOL C. Etude des potentiels préventifs et thérapeutiques de la consommation de fonio sur l'évolution du diabète sucré. DESS de nutrition et alimentation en PVD – Université de Montpellier II. CIRAD. Bamako. Mali. Octobre 2000. 74p + annexes.

19- MAROUZE C., THAUNAY P., SEIGE C., PONS B. 2001. Projet CFC/IGG – (FIGG/02) : Amélioration des technologies post-récoltes du fonio. CIRAD-IER-IRAG-IRSAT. Activité n°13 : Amélioration et conception d'équipements. Etude et mise au point d'un décortiqueur Engelberg pour le fonio et étude de la séparation dimensionnelle.

20- CRUZ J.F., DRAME D., DIALLO T., SON G. Mars 2002. Projet CFC/IGG – (FIGG/02) : Amélioration des technologies post-récoltes du fonio. CIRAD-IER-IRAG-IRSAT. Rapport semestriel de juillet 2001 à janvier 2002. 14p + annexes.

21- MAROUZE C., DRAME D., DIALLO T., SON G., FLIEDEL G., CRUZ J.F. 2002. Projet CFC/IGG – (FIGG/02) : Amélioration des technologies post-récoltes du fonio. CIRAD-IER-IRAG-IRSAT. Activités 23, 24, 25 et 26 : Fabrication locale d'équipements de transformation du fonio. Rapport n° 42. 15 p + annexes.

22- CRUZ J.F. 2001. CIRAD Département Cultures Annuelles, programme Cultures Alimentaires. Le fonio. 24 p.

23- FLIEDEL G., MARTI A., THIEBAUT S. 1996. Caractérisation et valorisation du sorgho. 345 pages. Bibliographie du CIRAD.

ANNEXES

Annexe n° 1

DETERMINATION DU TAUX D'HUMIDITE

1- Broyer la quantité nécessaire pour deux ou trois essais.

2- Peser à vide les capsules pré séchées à l'étuve, qui serviront à recevoir le produit.

3- Tarer ensuite les capsules avec leur couvercle

4- Peser environ 5 grammes de fonio à tester

5- Noter le chiffre exact de la pesée réalisée

6- Mettre les capsules ouvertes dans le four à humidité pendant 2 heures

7- Au bout de 2 heures récupérer les capsules, les fermer puis les mettre dans le dessiccateur (le vide ayant préalablement été réalisé durant 30 à 45 secondes)

8- Laisser refroidir sous vide pendant 20 à 30 minutes.

9- Peser les capsules avec leur couvercle.

10- La différence entre le poids de départ et d'arrivée de l'échantillon donne la quantité d'eau

% humidité = (quantité d'eau / poids initial de l'échantillon) x 100

Annexe n° 2

DOSAGE DES LIPIDES ETHEROSOLUBLES

Méthode utilisée avec le TECATOR SOXTEC type HT en laboratoire au CIRAD

1- Mettre la hotte en marche
2- Ouvrir le robinet d'eau du réfrigérant
3- Régler le bain d'huile sur 100°C et attendre sa mise en équilibre pendant une heure
4- Peser les capsules d'extraction en aluminium préalablement séchées à l'étuve à 100 ° C
5- Tarer les cartouches de cellulose et y mettre approximativement 5g d'échantillon broyé (noter précisément le poids)
6- Emboîter l'anneau mécanique sur chaque cartouche
7- Boucher avec de la ouate pour que l'éther diffuse uniformément sur la farine
8- Mettre cartouche et anneau métallique en contact avec le piston (bouton noir en position rinsing pour relever la cartouche)
9- Verser environ 50ml d'éther éthylique dans les capsules d'extraction tarées et séchées
10- Les encastrer dans la plaque percée, les positionner vers le haut et descendre l'ensemble avec la poignée gauche noire
11- Plonger les cartouches de cellulose dans les capsules
12- L'extraction des lipides éthérosolubles se fait dans l'éther bouillant sous reflux pendant 20mn en position boiling (robinet ouvert en position verticale)
13- Sortir les cartouches des capsules :position rinsing (robinet ouvert et bouton noir en bas)
14- Rincer sous reflux d'éther distillé pendant 40mn et ensuite fermer le robinet
15- A la fin du rinçage, le reflux d'éther est stoppé et les cartouches sont asséchées en éther au bout de 7 à 8 mn
16- Mettre les capsules à l'étuve à 100°C pendant 15mn puis peser après refroidissement dans un dessiccateur

La différence entre le poids de la capsule avant et après extraction correspond à la quantité de lipides La teneur en lipides se calcule par rapport à la quantité de matière sèche de l'échantillon.

Annexe n° 3

DETERMINATION DU TAUX DE MATIERES MINERALES

1- Broyer l'échantillon au Perten

2- Allumer le four jusqu'à 900 °C

3- A 700°C, mettre les capsules en silice dans le four pendant 20 à 30 minutes

4- Les laisser refroidir 30 min sous vide dans un dessiccateur .
(*Au moment de sortir les capsules en silice, les déposer sur une plaque en acier sinon risque d'explosion*)

5- Tarer les capsules en silice à vide

6- Peser 2,5 ou 5 grammes environ d'échantillon broyé

7- Mettre les capsules dans le four, au bord tout d'abord, afin que les broyats prennent feu (avec l'oxygène de l'air). Les déposer dans l'ordre aussi (les échantillons de fonio non blanchis sont mis au fond du four car ils y resteront 3h, alors que les blanchis seulement 2h30)

8- Sortir les capsules et les laisser refroidir à nouveau dans un dessiccateur

9- Peser les capsules et en déduire le poids de cendre de l'échantillon ainsi que la teneur en matières minérales. Exprimer par rapport à la matière sèche.

Annexe n° 4

DETERMINATION DE LA TENEUR EN AMYLOSE

La teneur en amylose et les températures de gélatinisation sont 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 (Mestres et al.,1996). 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 (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/mn, puis maintien à 160°C pendant 2 min et refroidissement jusqu'à 60°C à 10°C/mn. A partir du thermographe enregistré, sont calculées :

- Les températures de début, pic et fin de gélatinisation, déduit 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 à 65°C, correspondant à la variation d'enthalpie associée à la formation d'un complexe entre l'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 analysée dans les mêmes conditions :

$$\text{Amylose échantillon} = \frac{\Delta H(\textit{échantillon})}{\Delta H(\textit{amylosepuredepomme}\,\text{det}\,\textit{erre})}$$

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.

Annexe n° 5

L'INSTRON

L'instron ou le texturomètre est un appareil qui mesure la texture d'un produit cru ou cuit. Celui du laboratoire Qualité de produit de CIRAD est un modèle 4301 avec une capacité totale de 5KN qui fonctionne en traction ou en compression sous une traverse mobile. C'est une machine compacte comprenant

- un bâti et son entraînement
- un système de mesure des forces
- une console de commande reliée à un microprocesseur.

Le bâti est monté sur la base de la machine et le capteur de force est monté dans la traverse mobile et a une capacité de 0,5 à 5 KN. La vitesse de la traverse varie entre 0,05 et 500 mm/mn et sa course maximale est de 970 mm.
Un micro-ordinateur peut être utilisé avec la machine au moyen de l'option interface IEEE. Dans ce cas, les consignes d'essai sont imposées à la machine par le programme qui assure également l'exploitation des résultats ainsi que les calculs statistiques.

L'instron comprend plusieurs accessoires dont

- une cellule de back extrusion
- la cellule de KRAMER (simulateur de mastication)
- une cellule de compression
- une cellule de pénétrométrie
- une cellule OTTAWA

La cellule qui permet de mesurer la texture du fonio cuit est la cellule OTTAWA et l'analyse des données est faite avec le programme fermeté du riz selon la méthode MOSSMAN.
Cette cellule mesure la force nécessaire pour extruder l'aliment étudié à travers une grille de 14 orifices de 6mm de diamètre chacun. Le fonio est donc mis dans la cellule et le piston qui est relié au capteur de force, exerce dessus une compression. La capacité du capteur de force a été limitée à 1 KN, le déplacement du piston se fait du haut vers le bas dans une limite de 87 mm. La vitesse de déplacement imposée est de 100mm/min et, le seuil de charge de 10^{-15} KN et le niveau de charge maximal est de 1 KN.

Après chaque mesure, l'ordinateur permet de visualiser un graphique représentant la force d'extrusion (Newton)en fonction du déplacement (mm).

Annexe n° 6

CARACTERISATIONS TECHNOLOGIQUES ET BIOCHIMIQUE DE DIVERS FONIO BLANCHIS TRADITIONNELLEMENT

Variété de fonio				**Quantité de grosses impuretés (%)**	**Quantité de grains paddy (%)**	**Lavage**		**Teneur en lipides (% m. s.)**	**Teneur en protéines (% m. s.)**	**Teneur en matières minérales (% m. s.)**	**Brisures entre 400 et 500 µm (%)**
Provenance	**Etat de l'échantillon**					**Taux de particules en suspension (%)**	**Taux de cailloux, sables (%)**				
Mme Soumaré Bamako Mali	Fonio blanchi	Lavé	Précuit	< 0,1	0,06	0,32	Trace	0,3	7,69	0,28	1,7
Mme Soumaré Bamako Mali	Fonio blanchi	Lavé	Précuit	0,1	0,03	0,19	Trace	0,8	7,81	0,30	1,7
Mme Mariko Mali	Fonio blanchi	Lavé	Précuit	< 0,1	0,13	0,15	Trace	0,2	7,42	0,16	4,3
Mme Mariko Mali	Fonio blanchi	Lavé	Précuit	0,1	0,35	0,15	Trace	0,6	7,66	0,23	4,5
Femmes du fleuves Mali	Fonio blanchi	Lavé	Précuit	0,2	0,48	0,33	1,82	0,8	7,71	0,33	3,9
Orodara Burkina Faso	Fonio blanchi	Lavé	Précuit	< 0,1	1,08	0,33	Trace	1,2	8,47	0,38	1,9
TOME Burkina Faso	Fonio blanchi	Lavé	Précuit	< 0,1	0,04	0,09	Trace	0,9	9,40	0,22	2,4
Lanaya Burkina Faso	Fonio blanchi	Lavé	Précuit	< 0,1	0,36	0,16	Trace	0,7	7,55	0,53	2,9
X Burkina Faso	Fonio blanchi	Lavé	Précuit	< 0,1	0,25	0,48	Trace	0,6	8,43	0,41	5,2
Marché des céréales Mali	Fonio blanchi	Non lavé	Précuit	0,7	1,56	4,99	1,9	1,8	9,75	0,46	N R