Projet CFC/IGG - (FIGG/02)

Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio

CIRAD-IER-IRAG-IRSAT

Démarche de travail pour la mécanisation des opérations post-récolte du fonio, protocoles pour l'expérimentation et outils d'aide à la conception

Rapport de synthèse

Claude MAROUZE (Cirad-France)
Djibril DRAME (IER-Mali)

Juin 2004

SOMMAIRE

I. Introduction *1*

II. Démarche de travail *1*

III. Mécanisation des opérations post-récolte de fonio, liste des opérations *2*

IV. Activités amont de la conception *3*

1. Etat de l'art **3**

2. Recherche de principes de fonctionnement des équipements **3**

V. Expérimentation des matériels *4*

1. Identification des équipements **4**

2. Définition des protocoles d'essai en milieu contrôlé **5**

3. Définition des protocoles d'essai au stade pilote **7**

3.1. Convention avec le propriétaire pour la réalisation d'essai au stade pilote 7

3.2. Fiche de suivi d'essai au stade pilote 8

VI. Conception et/ou adaptation d'équipements *8*

1. Connaissance du besoin des opérateurs & analyse fonctionnelle **8**

2. Définition des équipements **10**

3. Fabrication locale **10**

4. Mise au point de l'équipement **11**

VII. Prise en compte de la dimension économique *11*

1. Démarche **11**

2. Moyen de calcul du coût de fonctionnement d'un équipement **12**

3. Evolution de la feuille de calcul au cours du temps **13**

VIII. Conclusion *14*

Références *15*

Annexe I : Classification des principes de décorticage des graines et graines (Marouzé, 2000) ..... **I**

Annexe II : Exemple de fiche d'essai en milieu contrôlé ..... **II**

Annexe III : Fiche d'essais en milieu réel de blanchiment de fonio décortiqué ..... **III**

Annexe IV : Fiche de calcul du coût de fonctionnement d'un équipement ..... **IV**

I. Introduction

Le fonio se caractérise par la petitesse de ses graines et la difficulté de réaliser les opérations post-récolte, en particulier, les opérations de battage, de décorticage et de blanchiment. Par ailleurs, l'activité de conception est une activité complexe faisant intervenir de nombreux domaines interdépendants. Au début du projet, les opérations de transformation étaient réalisées manuellement et les quelques équipements utilisés pour la transformation du fonio ne satisfaisaient pas leurs utilisateurs. La mécanisation des opérations post récolte de fonio était indispensable pour relancer la filière fonio et réduire la pénibilité du travail des femmes. Cette mécanisation imposait donc une démarche très rigoureuse pour conduire au succès et au développement d'équipements.

Le présent document retrace la démarche qui a permis la mécanisation de la chaîne des opérations de transformation du fonio et une capitalisation des résultats aussi bien techniques que méthodologiques. Il présente les outils d'aide à la conception et les protocoles d'essais des matériels utilisés ou développés durant le projet.

II. Démarche de travail

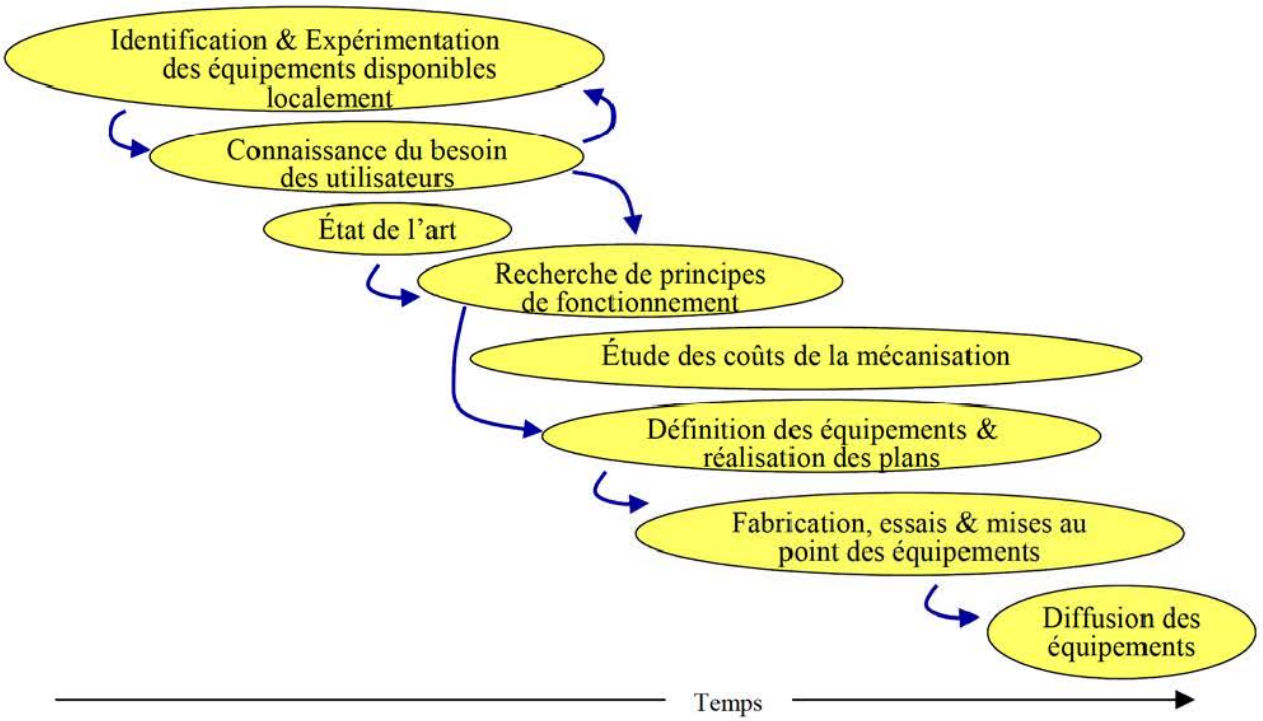

Fig. 1. Démarche de travail pour la mécanisation des opérations post-récolte du fonio

La démarche de travail pour le développement et la mise au point des équipements, suit le canevas la méthode CESAM de conception d'équipements dans les pays du Sud (Marouzé, 1999) avec la réalisation en parallèle de plusieurs activités comme le montre la figure 1. Les premières activités engagées sont l'expérimentation des matériels susceptibles d'être intéressant pour les opérations post-récolte du fonio, l'identification du besoin des futurs utilisateurs et l'état de l'art. Puis les activités de recherche de principes de

fonctionnement des équipements, d'étude économique et la définition des équipements s'enchaînent. La fabrication des équipements conçus sera suivie d'une phase d'essai et de mise au point plus ou moins longue selon les équipements conçus et les difficultés rencontrées lors de cette phase. Ce processus débouche sur la diffusion des équipements.

Les activités sont menées en parallèle mais leur démarrage et leur fin sont légèrement décalés dans le temps pour que les phases amont documentent les phases aval.

III. Mécanisation des opérations post-récolte de fonio, liste des opérations

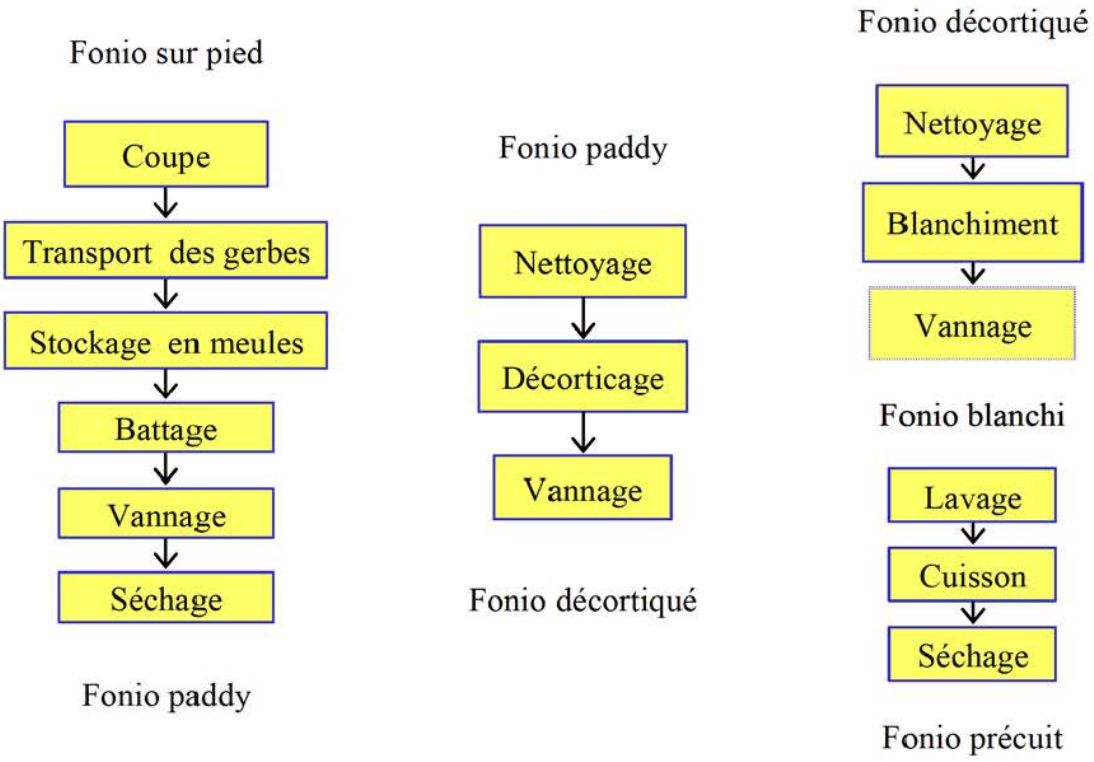

Fig. 2. Liste des opérations de post-récolte du fonio

Les opérations post-récolte du fonio peuvent être regroupées en 3 ou 4 groupes d'opération relatifs:

- au battage depuis la coupe des pailles sur le champ jusqu'à la production du fonio paddy, ces opérations sont réalisées le plus souvent au champ,
- au décorticage avec les opérations de nettoyage, de décorticage et de vannage qui permettent la production de fonio décortiqué,
- aux dernières opérations de transformation telles que le nettoyage, le blanchiment, le lavage, la cuisson et le séchage, le fonio étant commercialisé soit blanchi soit précuit.

Les opérations de battage, de vannage, de séchage, de décorticage, de blanchiment et de lavage ont fait l'objet d'études de mécanisation (essai de matériel, conception de nouveaux matériels ou améliorations d'équipements existant).

IV. Activités amont de la conception

1. Etat de l'art

La recherche de principes de fonctionnement d'équipements susceptibles d'être appliqués aux opérations post–récolte du fonio a été menée pour les principales opérations post-récolte des grains. Pour documenter la phase de conception proprement dite, en particulier, pour les opérations de décorticage – blanchiment, de séparation par voie sèche des impuretés, de lavage ou séparation par voie humide des impuretés et de battage une étude plus systématique a été engagée avec une recherche sur les principes de fonctionnement des équipements (Marouzé, 2000). Un extrait de cette classification est présenté en annexe I. Cette étude basée sur la recherche documentaire et les travaux antérieurs du Cirad, fait ressortir les principes de matériels intéressant pour la transformation du fonio. Un inventaire est présenté sous la forme de tableaux comprenant une :

- Description des principes fonctionnels avec les variantes du principe,
- Accompagnés des solutions techniques qui permettent de les mettre en œuvre,
- Une liste des équipements utilisant ce principe,
- Les paramètres de réglage généralement utilisés,
- Les avantages ou inconvénients potentiels concernant l'utilisation éventuelle de ce principe pour la transformation du fonio,
- Et une reproduction des principes ou équipements.

2. Recherche de principes de fonctionnement des équipements

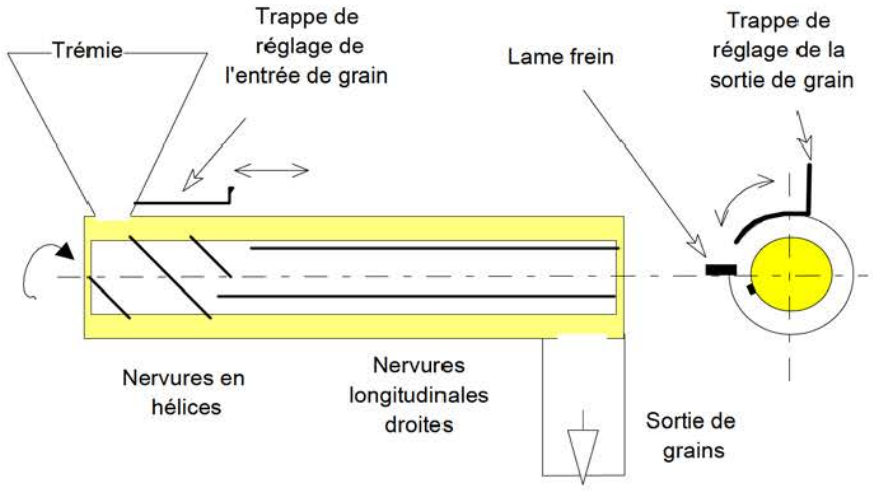

Fig. 3. Schématisation du principe du décortiqueur Engelberg.

Que ce soit pour l'expérimentation, la conception ou la mise au point, il est indispensable que l'équipe de conception comprenne bien le principe qui régit le fonctionnement de l'équipement sur lequel elle travaille.

Par exemple, le principe de fonctionnement du décortiqueur Engelberg (voir fig. 3) est de provoquer une friction et un cisaillement sous pression entre les grains et les parois du stator et du rotor pour détacher l'enveloppe des grains. La mise en pression est créée par les nervures d'entrée de forme hélicoïdale et le cisaillement par une interaction entre les nervures droites du rotor et la lame frein qui retient les grains.

La compréhension de ce principe va permettre de définir les réglages les plus pertinents. Par exemple la fermeture de la trappe de sortie augmente l'intensité du décorticage mais en même temps elle réduit le débit et le rendement d'usinage et augmente le pourcentage de brisures. Il est donc préférable de ne pas chercher à avoir le taux de décorticage maximal car cela est réalisé aux dépends des autres variables.

Durant le projet, les travaux de recherche de principe de fonctionnement d'équipements ont été réalisés pour les opérations de : nettoyage-calibrage, de décorticage-blanchiment, de vannage et de lavage. Des articles détaillant la démarche de recherche et de sélection des principes sont en cours de rédaction. La démarche comprend les étapes suivantes :

- Identification d'un maximum de principes en réalisant l'état de l'art le plus complet possible ou par des séances de créativité,
- Sélection par l'étude des documents des 3 à 4 principes les plus pertinents,
- Test d'au moins 2 principes le plus souvent à l'aide d'une maquette fonctionnelle,
- Cette phase se termine par la sélection du principe le plus pertinent qui sera utilisé pour les phases aval de la conception.

Les phases de recherche de principe de fonctionnement d'équipements sont présentées en détail dans les synthèses par opération (décorticage, nettoyage).

V. Expérimentation des matériels

1. *Identification des équipements*

L'objet de cette phase est d'identifier les équipements susceptibles d'être intéressants pour les opérations post–récolte du fonio que ceux-ci soient utilisés pour le fonio (mais ils sont peu nombreux) ou pour des céréales locales telles que le mil, le sorgho ou le maïs. L'expérimentation de ces matériels documente les équipes sur les problèmes réels de la mécanisation des opérations post-récolte du fonio et l'aptitude des matériels. Elle permet aussi aux « machinistes », ingénieurs et techniciens en charge de l'expérimentation et de la conception des équipements, d'identifier les besoins des utilisateurs lorsqu'ils les rencontrent lors de cette activité.

L'identification des équipements disponibles dans la zone du projet Fonio a été commencée dès la préparation du projet. La liste des matériels disponibles dans chaque pays a été actualisée en début de projet puis les essais ont commencé avec une répartition des tâches entre les partenaires.

2. *Définition des protocoles d'essai en milieu contrôlé*

L'essai en milieu contrôlé est un essai complet destiné à comprendre le fonctionnement de l'équipement. Le plus souvent, il est réalisé dans une halle d'essai où sont disponibles les moyens de mesure et d'essai. Il est réalisé par des techniciens, des « machinistes » ou concepteurs. L'essai nécessite une mise en place de la machine et la préparation du matériel pour l'expérimentation. Eventuellement, une convention avec le propriétaire de la machine doit être rédigée si la machine n'appartient pas aux à l'organisme en charge de l'essai.

La conduite d'un essai en milieu contrôlé impose d'avoir une connaissance de l'équipement et de son fonctionnement ; quel est le (ou les) principe(s) physique, thermique ou biologique qui assure la réalisation de l'opération de transformation ? L'équipement doit être décrit avec ces principales caractéristiques.

La connaissance du principe de fonctionnement va permettre d'identifier :

- les variables d'entrée ;
    - Celles définies par le concepteur original de la machine permettent de modifier le fonctionnement de l'équipement. Ces variables sont appelées points de réglage de la machine quant elles sont modifiables par l'opérateur. Exemple de variables définies par le concepteur : vitesses de rotation du rotor, écartement de la lame frein, ouverture des trappes, etc.
    - Celles relatives au produit à transformer sont des variables d'entrée : nature du produit, humidité, granulométrie, etc.
    - Celles définies par l'expérimentateur (quantité de produit à traiter).
- les variables de sortie qui résultent du principe de fonctionnement c'est-à-dire de la combinaison de la géométrie et des formes de l'équipement, et des variables d'entrée.
- l'influence des réglages sur les variables de sortie ce qui permet d'optimiser ces réglages et d'identifier les effets attendus de leur modification.

N.B. : Attention, certaines variables comme la durée d'un essai peuvent être des variables d'entrée ou de sortie selon le type d'équipement testé. Pour un équipement fonctionnant en batch, la durée de l'essai, est une variable d'entrée car c'est l'opérateur qui arrête le traitement alors que pour une machine fonctionnant en continu, la durée de l'essai est une variable de sortie car elle résulte du débit de la machine et de la quantité de produit traité.

Les variables d'entrée et de sortie sont listées dans un tableau qui constitue la fiche d'essai en milieu contrôlé (voir exemple en annexe II, fiche d'essai du décortiqueur GMBF et tabl. 1). Ce tableau comporte des colonnes avec :

- le numéro de l'essai,
- les variables d'entrée avec leurs unités,
- le relevé des variables de sortie avec leurs unités,
- les données finales résultant de calculs qui, par commodité, peuvent être intercalés après les variables de sortie dont elles dépendent (débit après la colonne durée de l'essai).

Le tableau 1 montre un extrait d'une fiche d'essai en milieu contrôlé dont l'élaboration a suivi les règles suivantes :

- Les trois premières lignes du tableau sont utilisées pour décrire les variables et leurs unités.
- Les essais sont numérotés dans l'ordre chronologique de leur réalisation ; il faut éviter que deux essais différents portent le même numéro.
- La première ligne utile du tableau (la 4ème dans le cas présent) permet de décrire les conditions de réalisation de la série d'essais qui suit.
- Les lignes suivantes sont utilisées pour le report des valeurs d'une série d'essai.
- Les remarques sur un essai ou sur une série sont notées sur la ligne suivant le relevé des valeurs.
- Les valeurs sont inscrites sur le tableau avant l'essai pour les conditions de réalisation et les variables d'entrée ou juste après l'essai pour les variables de sortie, les calculs ou les remarques. Les calculs sont réalisés au fur et à mesure des essais ; l'analyse des premiers résultats permet de définir ou de redéfinir les réglages des essais suivants.
- Les données sont mises au propre dans un tableau Excel juste après l'essai et les valeurs issues de mesures de laboratoire sont consignées dès que disponibles. les calculs sont vérifiés par le tableur.
- A partir de ce tableau complet de données, un tableau synthétique est extrait ou seules, les valeurs intéressantes pour l'analyse sont présentées.
- Quand deux passages sont nécessaires pour assurer la transformation du produit (par exemple, premier passage de décorticage et deuxième passage de blanchiment), trois lignes sont utilisées, une pour chaque passage et une troisième ligne permet de faire les calculs pour les deux passages (voir en annexe II, lignes 5, 6 et suivante).

Relevé des variables d'entrée							Relevé des variables de sortie et calculs				
Essais N°	Ecartement lame frein	Position trappe d'alimentation	Position trappe sortie	Trappe de débit d'air dans canal	Vitesse rotor à vide	Masse à décortiquer	Durée de l' essai	Débit	Masse grain sortie	Rendt d'usi-nage	% de grain paddy
	mm	mm	mm	N°	tr/mn	kg	mn:ss	kg/h	kg	%	%
Série d'essais du 23 janvier 2003, blanchiment de fonio décortiqué de San											
1	0,6	20	10	5	920	20	10:05	115	18,0	90%	
2	0,6	20	8	5	920	20	12:00	100	17,6	88%	
	Bonne qualité de blanchiment pour l'essai n° 2										

Tableau 1. Extrait d'une fiche d'essai en milieu contrôlé

Nota : les équipements sont d'autant plus faciles à utiliser qu'il existe une relation directe entre les réglages et les variables de sortie, que les réglages n'ont pas d'interaction entre eux et que le nombre de réglages utilisés pour un bon fonctionnement de l'équipement est le plus réduit possible.

Il est fortement conseillé aux expérimentateurs d'inviter lors de ces essais en milieu contrôlé quelques utilisateurs finaux de l'équipement qui apporteront un autre regard sur le fonctionnement de l'équipement et leur connaissance et appréciation de la qualité finale du produit.

3. Définition des protocoles d'essai au stade pilote

Les essais au stade pilote sont les essais en milieu réel, chez l'agriculteur ou le transformateur avec son produit, la machine étant utilisée par lui-même ou ses personnels après une formation. Pour réaliser des essais au stade pilote, l'équipement doit d'abord avoir satisfait les essais en milieu contrôlé. La réalisation d'essais au stade pilote répond aux objectifs suivants :

- Mener des essais de longue durée dans les conditions réelles pour tester la durabilité du matériel,
- Connaître l'avis de (ou des) utilisateur(s) sur le matériel,
- Collecter les données économiques.

La connaissance des expérimentateurs permettra d'identifier le (ou les) partenaire(s) chez lesquels seront réalisés les essais. Dans le cadre d'une démarche de conception collaborative, il s'agira des « clients leaders » identifiés dès les phases amont de la conception. Sinon, les partenaires seront choisis dans la zone de production où existe un besoin réel pour le type de mécanisation envisagée en vérifiant que :

- les quantités traitées, sont suffisantes pour la réalisation des essais et compatibles avec la capacité de la machine,
- les coûts de l'opération manuelle sont compatibles avec une mécanisation (si les coûts sont très faibles la mécanisation n'est pas économiquement rentable),
- les partenaires sont intéressés par la mécanisation et sont disponibles.

Il est préférable de choisir des zones facilement accessibles pour l'équipe de recherche-développement, des opérateurs alphabétisés et des transformateurs qui ont l'habitude d'utiliser des équipements ou de transformer le produit.

Le projet a défini un protocole d'essai au stade pilote d'équipement agricole ou agroalimentaire décrit dans le rapport de l'Atelier de conception d'équipements de Bamako du 4 au 8 mars 2002 (Marouzé *et al.*, 2002). Ce protocole comprend :

- une convention type entre l'entreprise et le centre de recherche qui définit les modalités de réalisation des essais (voir ci-après), un accord verbal avec l'entreprise peut suffire,
- une fiche de suivi d'essai au stade pilote qui identifie les principales données relatives aux quantités traitées, aux réglages et à la qualité des produits.

3.1. Convention avec le propriétaire pour la réalisation d'essai au stade pilote

Les conditions de réalisation des essais au stade pilote chez un opérateur doivent être précisées pour éviter toute complication ultérieure. Il est souhaitable de les formaliser mais si les acteurs se connaissent bien un accord verbal est suffisant. Il faut prévoir un accompagnement dégressif de l'équipe de recherche-développement auprès de l'utilisateur que l'on peut prévoir en 4 phases (Marouzé *et al.*, 2002):

1. D'abord une prise en main de l'équipement par l'utilisateur avec un appui complet de l'équipe de recherche, une formation de l'utilisateur et une démonstration du fonctionnement de l'équipement.
2. Un essai permettant de vérifier la conformité de performances du matériel.
3. Puis, une phase d'utilisation de la machine par le transformateur avec un suivi rapproché par l'équipe de recherche.
4. Ensuite, un accompagnement plus espacé dans le temps durant le reste de la période d'essai.

Dans tous les cas, la durée maximale des essais doit être fixée dès leur début.

3.2. Fiche de suivi d'essai au stade pilote

Un exemple de fiche est présenté en annexe III. Cet exemple de fiche est plus détaillé que ne devrait l'être un essai en milieu réel car des prélèvements ont été systématiquement réalisés sur les produits entrant et sortant pour les caractériser.

VI. Conception et/ou adaptation d'équipements

L'expérimentation des matériels montre que pour les opérations de nettoyage, de décorticage-blanchiment et de lavage, il n'existait pas de matériels réellement adéquats pour le fonio et que pour d'autres opérations telles que le battage, le séchage ou le vannage des améliorations d'équipements étaient nécessaires. Une phase de conception et adaptation d'équipements a donc été engagée.

1. Connaissance du besoin des opérateurs & analyse fonctionnelle

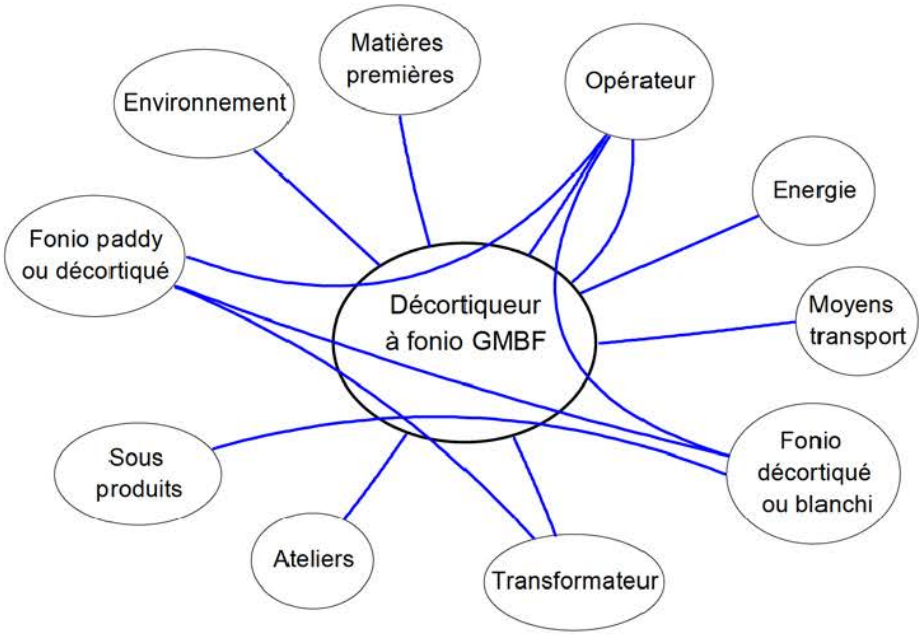

Fig. 4. Pieuvre du décortiqueur - blanchisseur à fonio GMBF, relations entre le décortiqueur avec les milieux environnants

L'identification des pratiques des acteurs de la filière fonio menée lors de la première année du projet et les échanges avec les opérateurs réalisés lors des essais de matériels ont permis d'identifier les besoins des opérateurs. Ces besoins ont ensuite été traduits en cahier des charges fonctionnel (CdCF).

L'analyse fonctionnelle est un outil qui vise à définir les spécifications du futur équipement indépendamment des solutions techniques qui seront retenues pour le réaliser (Delafolie, 1991). Il en résulte une représentation appelée pieuvre (voir figure 4) qui schématise les relations entre l'équipement et son milieu extérieur et un cahier des charges comprenant une liste de fonctions de service et pour chacune d'elles des critères d'appréciation et des niveaux. Le CdCF du décortiqueur à fonio GMBF (Guinée, Mali, Burkina Faso et France) est présenté dans le tableau 1. Les CdCF réalisés lors du projet sont présentés dans (Marouzé *et al.*, 2002). Ce CdCF doit ensuite être validé par les utilisateurs finaux de l'équipement : il leur est présenté et ceux-ci peuvent modifier la formulation des fonctions, définir les niveaux pour chaque critère d'appréciation et doivent déterminer les plus importantes. Cette validation n'a été que partiellement réalisée lors de ce projet. Le CdCF constitue le document de référence pour la suite de la conception de l'équipement.

Fonction de service	Critère d'appréciation	Niveau
Le décortiqueur - blanchisseur de fonio …. doit transformer le fonio paddy en fonio décortiqué ou transformer le fonio décortiqué en fonio blanchi	Débit en blanchiment Débit en décorticage Débit en décorticage- blanchiment	100 à 150 kg/h 100 à 120 kg/h 60 à 100 kg/h en 2 passages
	Taux de grains non décortiqués Taux de blanchiment	< 2 % environs pour le fonio décortiqué selon segment de marché < 0,1 % pour le fonio blanchi > 99,5 %
	Rendement de décorticage Rendement de blanchiment Rendement d'usinage	70 à 75 % environ 90 % 60 à 65 %
	Taux de lipides du fonio blanchi	< 1%
	Température de sortie du produit	≤ 80 °C
doit séparer le fonio usiné des sous produits	Taux de cendres Taux de sons dans le grain Pertes en grains	< 1% < 0,5 % < 1 %
doit utiliser l'énergie disponible	Type d'énergie, Puissance	Gazole ou électrique 7,5 kW pour le décorticage ou 5,5 kW pour le blanchiment seul
doit être d'un prix accessible pour l'utilisateur - acheteur	Prix d'achat, Coût de fonctionnement,	800 000 FCFA, sans moteur Légèrement supérieur à celui du décorticage des autres céréales
doit s'intégrer dans l'environnement du lieu d'utilisation	Surface au sol nécessaire T°C, HR, vent et poussières	6 m² Conditions tropicales soudano-saheliennes
doit respecter les normes	Normes de sécurité, Non dégradation du fonio, Sécurité de l'opérateur	Oui Oui Oui

doit permettre à l'opérateur de charger le fonio paddy	Capacité, Hauteur de la trémie	35 kg 1,4 m
doit permettre à l'opérateur de récupérer le produit fini et d'évacuer les sous produits	Accessibilité des zones de vidange des produits finis et des sous produits Hauteur sortie produit	Oui = ou > 45 cm
doit requérir au maximum les matières d'œuvre disponibles localement	Choix de matières d'œuvre, Disponibilité des outils	Disponible sur place Réalisation avec les machines-outils d'un l'atelier local de fabrication
doit permettre à l'opérateur d'intervenir avec les compétences et outils disponibles	Simplicité d'utilisation de la machine, Disponibilité des pièces et outils	Minimum de réglages Action directe Disponible
doit être facilement entretenu par l'opérateur	Fréquence et durée d'entretien, Niveau de compétence	< ½ h par journée de travail Courant
doit être réalisable dans les ateliers locaux	Savoir-faire local	Compatible avec le savoir-faire existant
doit être transportable avec les moyens disponibles	Encombrement, Poids	Transportable par pick- up charrette, 320 kg (avec moteur thermique)

Tableau 3. Cahier des charges fonctionnel du décortiqueur à fonio GMBF.

2. *Définition des équipements*

A partir du principe retenu et pour chaque fonction technique, les surfaces fonctionnelles sont définies. Celles-ci servent de référence pour la définition des principales pièces de l'équipement. Les autres pièces nécessaires, par exemple, à la structure de l'équipement sont définies ensuite de même que les assemblages. Les dessins sont réalisés en trois dimensions volumiques ce qui permet un rendu volumique permettant une meilleure compréhension des pièces par les opérateurs de fabrication. Pour chaque pièce une représentation papier est réalisée avec une perspective.

3. *Fabrication locale*

Le choix des partenaires fabricants a été effectué en tenant compte de leurs avantages comparatifs : fabrication antérieure de matériels de même type, existence d'un réseau commercial, capacité de fabrication, souhait du fabricant de lancer un nouveau produit.

L'intégration de la fabrication dans la démarche de conception est indispensable pour rendre possible la fabrication en respectant l'objectif de coût du futur équipement donc de sa diffusion. Celle-ci est réalisée en s'assurant que les approvisionnements (matière première ou composants) sont réellement disponibles, de même que le savoir-faire de l'entreprise et les machines outils nécessaires à sa réalisation. Symétriquement, les choix de conception sont pilotés par les conditions locales de réalisation. Pour faciliter cette approche et pour les équipements déjà matérialisés sous la forme d'un prototype ou d'une « définition papier » (plans de fabrication), l'outil des « Check-lists » est utilisé (Marouzé et Dramé, 2002). Il

s'agit d'assurer l'intégration au niveau composant, le mode d'intégration le plus pertinent dans le contexte des pays du Sud.

Chaque équipement a ses propres spécificités vis-à-vis des aspects fabrication. Pour les équipements développés lors du projet, les principales contraintes ont été les suivantes:

- Crible rotatif, approvisionnement en treillis fin résistant,
- Canal de vannage, assemblage précis de pièces en tôles,
- Décortiqueur, précision de fabrication et d'assemblage,
- Dispositif de lavage, disponibilité de matériaux bon marché compatibles avec l'utilisation de l'eau.

4. *Mise au point de l'équipement*

Quand les plans sont définis, la fabrication de l'équipement peut alors être engagée (voir fig. 5). Cette acticités est normalement rapide néanmoins, des adaptations sont parfois nécessaires, car la compréhension du savoir-faire de l'équipementier par le concepteur n'est réellement perçue que lors d'un travail conjoint de réalisation. Ensuite, le matériel après un test rapide en milieu contrôlé subit des essais au stade pilote. Les plans de définition de l'équipement doivent ensuite être repris pour intégrer les améliorations relatives à la fabrication ou celles répondant aux modifications liées aux difficultés rencontrées lors des essais. Si pour le crible et le canal de vannage, l'équipe de conception est parvenue rapidement au modèle définitif, plusieurs bouclages ont été nécessaires pour le décortiqueur en particulier pour résoudre les problèmes d'usure des pièces travaillantes (voir fig. 5).

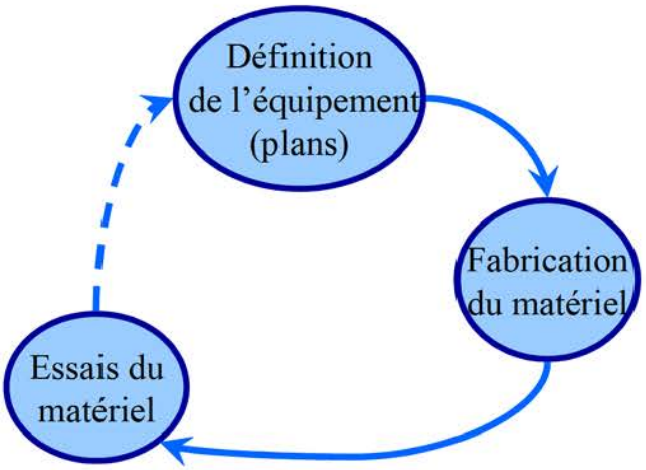

Fig. 5. Gestion du développement de l'équipement

VII. Prise en compte de la dimension économique

1. *Démarche*

Pour éviter de concevoir des équipements qui ne sont pas accessibles aux utilisateurs soit, à cause de leur niveau d'investissement trop élevé, soit, de leur coût de fonctionnement excessif, une démarche spécifique a été mise en œuvre lors des projets de conception pour atteindre l'objectif de coût de l'équipement défini au début du projet (voir figure 6). Un des

buts de la conception de nouveaux équipements est de réduire les coûts de l'opération de transformation pour assurer un avantage compétitif à l'équipement conçu mais aussi pour mettre sur le marché des produits alimentaires bon marché accessibles aux populations les plus défavorisées. La démarche utilisée suit les étapes suivantes :

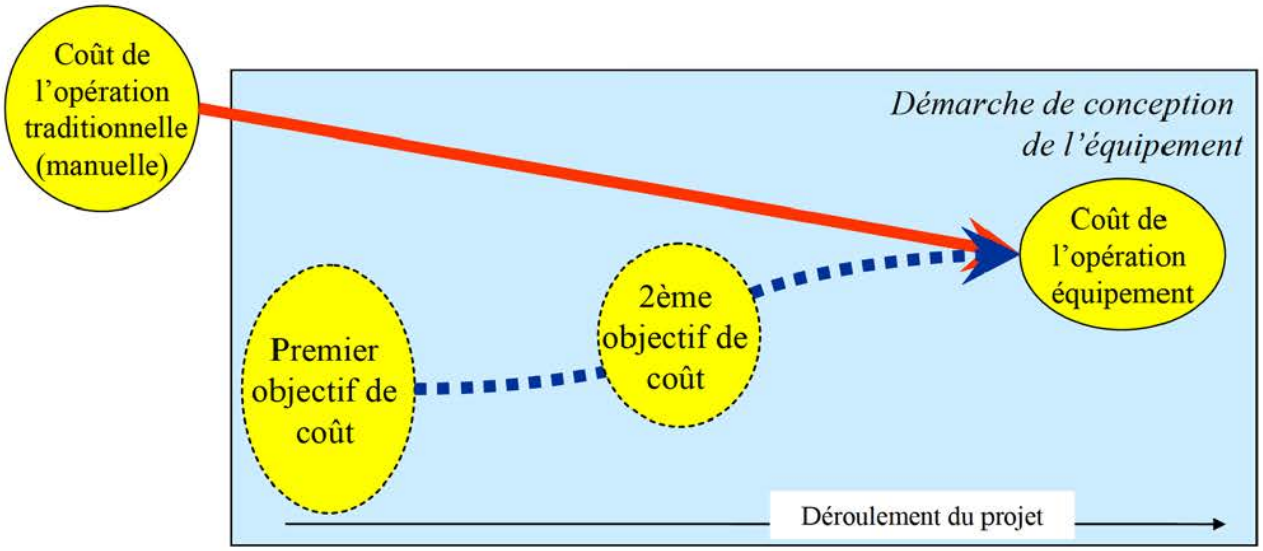

Fig. 6. Prise en compte de la dimension économique dans le projet Fonio.

- Identifier les coûts de la transformation traditionnelle que l'opération soit réalisée manuellement ou mécaniquement,
- Définir un premier objectif de coût de fonctionnement (avec un objectif de prix de vente) qui valorisera l'équipement conçu mais qui aussi permettre aux concepteurs de réaliser la conception,
- Mettre en œuvre un moyen de calcul et actualiser le coût calculé en fonction des choix de conception, l'objectif de coût pouvant évoluer lors des différentes phases de la conception,
- Vérifier lors des essais au stade pilote que le coût réel de fonctionnement est conforme aux prévisions.

Cette démarche a été menée avec succès pour des équipements de transformation du fonio (décortiqueur, canal de vannage, cribles).

2. *Moyen de calcul du coût de fonctionnement d'un équipement*

Une fiche constituée d'une feuille Excel et présentée en annexe IV comporte les rubriques suivantes :

- Description du projet ; avec le nom du projet, celui de l'équipement, la date d'actualisation, la monnaie utilisée, les accessoires ou les options de l'équipement, l'opération considérée.
- Prix d'achat de l'équipement, celui-ci doit être détaillé de telle manière qu'apparaisse le prix réellement payé par l'utilisateur.

- Caractéristiques de l'équipement ; puissance et consommation d'énergie. Il est fortement souhaitable d'intégrer, si elles sont connues, les données concernant la durée de vie des pièces d'usure car leur impact est significatif sur le coût de fonctionnement.
- Nombre d'heures d'utilisation de la machine. Cette rubrique fait intervenir deux coefficients :
    - Disponibilité de la machine : Il s'agit de la disponibilité opérationnelle de la machine. Les périodes de non-disponibilité pour entretien, réglage, nettoyage, sont soustraites (complément à 100 %). Une disponibilité de 85 % signifie que 15 % du temps de fonctionnement la machine n'est pas disponible. Le personnel est présent et travaille durant ces heures 15 % de temps.
    - Coefficient d'utilisation. Ce coefficient prend en compte les jours fériés, les jours où le personnel n'est pas disponible, les jours où il n'y a pas de clients, les jours de pluie, etc. Le personnel ne travaille pas durant ces heures.
- Paramètres économiques ; coefficient de réparation, taux et durée du prêt si emprunt pour l'achat de la machine, coût des différentes pièces ou composants nécessaires au fonctionnement de la machine.

Un coefficient de réparation est utilisé pour évaluer le coût de réparation : un coefficient de 1 signifie que le coût des réparations durant l'ensemble de la vie de l'équipement est égal au prix d'achat de la machine. Ce coefficient varie en fonction du type de machine, de son utilisation et de sa motorisation. Dans le cas présent, le coût de la réparation des principales pièces d'usure est intégré dans l'évaluation ce qui conduit à prendre un coefficient de réparation plus faible.

A partir de ces données un premier calcul est effectué, il s'agit du **tonnage annuel traité par la machine**. Cette valeur doit être en adéquation avec ce que le transformateur traite annuellement ou avec son objectif de production après achat de la machine.

- Il est nécessaire de choisir une unité de base de calcul. Pour les matériels fonctionnant en continu, la base de calcul la plus commode est l'heure de fonctionnent effective. Pour les matériels fonctionnant en batch, les données doivent être rapportées au batch. Ce n'est qu'à la fin de la feuille que le coût est calculé par kilogramme de produit transformé.

L'ensemble de ces données permet le **Calcul du coût d'utilisation de la machine** par rapport à l'unité de base de calcul. Ce coût se décompose en deux rubriques les charges fixes qui sont indépendantes de la quantité traitée et les charges proportionnelles.

A la dernière ligne de la feuille, est calculée **du coût d'utilisation de la machine par kilogramme de produit traité.**

3. Evolution de la feuille de calcul au cours du temps

L'évaluation du coût de fonctionnement d'un équipement n'est réellement précise que lorsque le projet atteint son terme mais dès que le cahier des charges fonctionnel est rédigé, il est possible de faire une première évaluation à partir des données du CdCF. Inversement, cette première évaluation des coûts va consolider la définition des niveaux de critères d'appréciations de fonctions.

L'évaluation va être de plus en plus précise au fur et à mesure de l'avancement du projet. Dans tous les cas, il est important d'avoir la plus grande objectivité possible pour les valeurs qui sont portées sur la fiche. Par exemple, le « *Tonnage annuel traité par la machine* » permet de vérifier si on est bien dans les conditions réelles des transformateurs.

Certaines rubriques sont faciles à documenter (coût de l'énergie, de la main d'œuvre, etc.). D'autres sont plus délicates à définir (facteur de réparation). Enfin, certaines rubriques apparaissent au cours du développement de l'équipement ; dans le cas du décortiqueur GMBF, les lignes relatives au renouvellement des lames frein, des coquilles et de la rénovation des rotors n'étaient pas dans les premières versions des fiches. Les fiches réalisées pour chacun des matériels développés dans le cadre du projet ont fortement contribué aux choix de conception.

VIII. Conclusion

Ce papier présente la démarche, les protocoles d'expérimentation et les outils d'aide à la conception développés ou utilisés durant le projet Fonio. La conception des équipements a été menée selon une démarche construite basée sur de nombreux éléments de la méthode CESAM. Les résultats sont très satisfaisants que ce soit au niveau technique, économique ou de la satisfaction des utilisateurs finaux. De plus, une capitalisation des résultats obtenus tant au niveau méthodologique qu'au niveau technique vient enrichir le domaine de la conception et pourra être utilisé pour d'autres projets.

La difficulté de la conception est liée à la prise en compte de contraintes variées et souvent contradictoires qui, de plus, évoluent au cours du projet. Néanmoins, l'utilisation d'une démarche structurée a conduit à la mise au point de quatre équipements et à la publication des dossiers de fabrication de ces matériels (Marouzé *et al.*, 2005; Marouzé *et al.*, 2005; Marouzé *et al.*, 2005; Marouzé *et al.*, 2005). La diffusion de ces matériels est déjà largement engagée.

Références

Delafolie, G. (1991). Analyse de la valeur. Paris.

Marouzé (1999). Proposition d'une méthode pour piloter la trajectoire technologique des équipements dans les pays du Sud. Application au secteur agricole et agroalimentaire. ENSAM Paris. Paris.

Marouzé, C. (2000). Projet Fonio CFC/ICG - (FIGG/02) Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio CIRAD-IER-IRAG-IRSAT. Etude des équipements existant susceptibles d'être appliqués à la transformation du Fonio, Activité n° 6, Inventaire des principes de décorticage-blanchiment, de séparation et de battage. Montpellier, CIRAD-AMIS n° 58/2000.

Marouzé, C., J. Brouat, S. Zangré et D. Dramé (2005). Dossier de fabrication Crible Rotatif Manuel Court CRMC Projet Fonio CFC/ICG - (FIGG/02) Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio CIRAD-IER-IRAG-IRSAT. Harmattan, Paris.

Marouzé, C. et D. Dramé (2002). Projet Fonio CFC/ICG - (FIGG/02) Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio CIRAD-IER-IRAG-IRSAT, Activités 14, 23 et 24. Atelier de Conception d'équipements de Bamako du 4 au 8 mars 2002. Formation aux protocoles d'essai au stade pilote des matériels de transformation de fonio et intégration de la fabrication locale dans la démarche de conception. CIRAD-AMIS, n° 32/02, Mars 2002. Montpellier.

Marouzé, C., D. Dramé, J. Brouat et B. Coulibaly (2005). Dossier de fabrication Crible Rotatif Long CRL. Projet Fonio CFC/ICG - (FIGG/02) Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio CIRAD-IER-IRAG-IRSAT. Harmattan, Paris.

Marouzé, C., P. Thaunay, D. Dramé et A. Diop (2005). Dossier de fabrication Canal de vannage pour grains et graines. Projet Fonio CFC/ICG - (FIGG/02) Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio CIRAD-IER-IRAG-IRSAT. Harmattan. Paris.

Marouzé, C., P. Thaunay, D. Dramé, F. Loua, G. Son et A. Diop (2005). Dossier de fabrication Décortiqueur GMBF à Fonio. Projet Fonio CFC/ICG - (FIGG/02) Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio CIRAD-IER-IRAG-IRSAT. Harmattan. Paris.

ANNEXES

Annexe I : Classification des principes de décorticage des graines et graines (Marouzé, 2000)

PRIN-CIPE	SOUS CRITERE	DESCRIPTION	EQUIPE-MENT	SOLUTIONS TECHNIQUES	PARAMETRESDE REGLAGE	APPLICATION POS-SIBLE POUR LE FONIO
1. Abrasion par le rotor (voir fig. 2)	1.1. Abrasion par le rotor + grille	Mouvement relatif élément abrasif / grain + élimination déchets par la grille au fur et à mesure de leur production	- Cônes à blanchir (planche A) - Blanchisseur - DMS 500 (planche B)	Elément abrasif cyl. ou conique continu + grille externe assurant la retenue des grains	Vitesse linéaire Espacement abrasif – grille Type d'abrasif Type de grille Débit ou temps de traitement	Souvent réservé aux opérations de finition Problème de la taille des perforations des grilles pour le fonio
	1.2. Abrasion par le rotor + auget (fig. 4)	Mouvement relatif élément abrasif / grain avec le grain contenu dans un auget	PRL, mini PRL (planche C), NUHULL (planche D)	Elément abrasif cyl. continu ou discontinu (meules ou disques) Auget en U	Vitesse linéaire Espacement abrasif – auget Type d'abrasif Disposition des éléments abrasifs Débit ou temps de traitement	Décorticage et blanchiment Fonctionnement continu ou batch Elément abrasif disques ou meules
	1.3. Abrasion + cisaille-ment	Abrasion entre deux abrasifs	- Décortiqueur à meules - Décortiqueur à sésame indien (planche F)	Meule tournante et meule dormante	Vitesse linéaire Espacement entre abrasifs Type d'abrasif Forme des éléments abrasifs	Extrapolation aux petites graines ?

Tabl. I : Extrait de la classification des principes de décorticage de graines et graines (Marouzé, 2000).

Annexe II : Exemple de fiche d'essai en milieu contrôlé

Réglages							Variables de sortie et calculs									
Essais N°	Ecartement lame frein	Trappe d'ali-mentation	Trappe sortie	Trappe de débit d'air	Vitesse à vide	Masse à décor-tiquer	Vitesse en charge	Vitesse ventilateur	Température sortie	Durée de l'essai	Masse Grains vannés	Débit	Rendt d'usinage	Pertes sous machine		Paddy compt. manuel
	mm				tr/mn	kg	tr/mn	tr/mn	°C	h/mn/ss	kg	kg/h	%	kg	%	%
Série d'esai du XX XX XX, décortiqueur GMBF 02 après modification, décorticage et blanchiment en 2 passages																
5	0,6	Ouv.		12	915	12,56	905		61	7'39	9,2	99	73,2%			
6	0,6	Ouv.		12	915	9,20	905		71	6'04"	8,6	93	93,0%			
				Pour les deux passages								*55*	*68,2%*			
Essai le 08 02 03, décorticage de paddy, moteur diesel tournant à 1900 tr/mn à vide, réalisé chez IMAF																
Décorticage de paddy,																
GMF 5	0,6-0,7	5	0,5-1	1,5 cm	940	10,0	920	3500	71	4'49"		125				
GMF 6	0,6-0,7	5		1,5 cm	940	12,7	920	3500		7'17	6,76	105	53,2%			
	Décorticage non maîtrisé à cause d'une position incorecte de la trappe de sortie de grain.															
Essai le 08 02 03, blanchiment des lots de fonio 5 et 6 après modifications																
GMF 7	0,6-0,7	5	2	1,5 cm	960	13,3	940	3530	67	5'	11,58	144	87,2%		Environ 0,3 %	
	Blanchiment satisfaisant avec débit élevé et faible température des grains à la sortie de la machine.															

Tabl. II : Exemple de fiche d'essai en milieu contrôlé.

Annexe III : Fiche d'essais en milieu réel de blanchiment de fonio décortiqué

Type de matériel : Décortiqueur GMF01 couplé au canal de vannage.
Site de l'essai de démonstration du matériel aux transformatrices de fonio : IER/LTA CRRA- Sotuba , Bamako Mali.
Période : février et mars 2002.

Date	Désignation du produit entrant	Quantité (kg)	Débit (kg/h)	Rendement d'usinage (%)	Taux de paddy (%)		Taux de brisures sur tamis 0.5 mm (%)		***Appréciations des transformatrices***
					Avant	Après	Avant	Après	
11.02.02	4 sacs de fonio décortiqué de UCODAL	357	183	92	3.3	0.00	3.3	8.3	Très bonne dans l'ensemble sauf pour 1 sac
	1 sac de Mme COULIBALY	95	142	90	nd	nd	nd	nd	Excellente et mieux que le blanchiment manuel, facile à laver, permet une valorisation des sons
19.02.02	1er sac Mme SOUMARE	95	108	86.9	12.4	0.02	3.3	5.8	Excellente et nettement mieux qu'en manuel en débit, facilité de lavage et pas de différence pour le taux de brisures
	2ème sac Mme SOUMARE	93	163	89.8	3.9	0.00	4.2	6.6	
	2ème sac de Mme COULIBALY	102	102	87.7	4.1	0.00	3.3	13.3	Excellente et mieux que le manuel en degré de blanchiment, facilité de lavage et en possibilité de valorisation les sons
05.03.02	2 sacs des dames au bord du fleuve	187	150	89.8	5.5	0.08	5.0	10.0	Excellente et nettement mieux que le manuel en débit, facilité de lavage et rendement
07.03.02	1 sac de la SAHELIENNE	102	132	90.8	3.2	0.04	5.8	11.5	Excellent
Moy.			**136**	**89.6**		**0.023**		**< 10 %**	

Remarques :
- Les essais ont été effectués aux réglages suivants : écartement de la lame frein : 0.6 mm, ouverture trappe d'alimentation : 4 à 5, ouverture trappe de sortie : 2.5 à 3
- La température maximale relevée sur le produit sortant était de 74 °C pour une température initiale de 30 à 35 °C

Annexe IV : Fiche de calcul du coût de fonctionnement d'un équipement

Projet CFC/ICG - (FIGG/02)				Fiche C. Marouzé du 04 03 02		
Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio			**Unité monétaire :**		**F CFA**	
CIRAD-IER-IRAG-IRSAT				1 EURO =	655,96 FCFA	
			Date de réalisation :		23 03 04	
				Par :	C. Marouzé	
Fiche évaluation du coût d'utilisation d'un équipement						
Type d'équipt :		**Décortiqueur GMBF à moteur électrique**				
Type d'utilisation :		**Blanchiment atelier Bamako**				
Prix d'achat de l'équipement	PR = Pd + Pa + Pt				**1 000 000**	**F**
Prix départ usine décortiqueur nu	Pd			750 000 F		
Prix accessoires (moteur, etc.)	Pa			150 000 F		
Coût de mise à disposition (transport, montage, taxe	Pt			100 000 F		
Caractéristiques de la machine						
Puissance moteur	P	*5,5*	kW			
Consommation horaire électrique	Puis. Cons	4	kW			
Durée de vie d'une lame	D.lame	12	t	en blanchiment		
Durée de vie d'une coquille	D.coq	10	t	en blanchiment		
Durée de vie du rotor rechargé	D.rotor	40	t	en blanchiment		
Débit théorique	Dth	*100 à 150*	kg/h			
Débit horaire en continu durant la journée de travail	Dréel	140	kg/h			
Nombre de personnes nécessaires pour la conduite	Nbre.m	0,5				
Nombre d'heures d'utilisation de l'équipement	Nv = D.vie*D.an*Nh/j*Dis.m*Coef.ut				**2 880**	**h**
Durée de vie de l'équipement	D.vie	8	ans			
Durée de la campagne d'utilisation de la machine	D.an	125	j			
Nombre d'heures d'utilisation par jour	Nh/j	4	h			
Disponibilité de la machine	Disp.m	90%				
Coefficient d'utilisation (clients, personnels, jours fér	Coef.ut	80%				
Nombre d'heures réelles d'utilisation par an		**360**	**h**			
Paramètres économiques						
Facteur de réparation	F.rép	0,4				
Taux d'Intérêt	Int.	18%				
Durée du prêt	D.pr	2	ans			
Coût d'électricité	Coût.kWh	160	F/kWh			
Coût d'une lame	C.lame	7 500	F			
Coût d'une coquille	C.coq	24 000	F			
Coût de rechargement du rotor	C.rotor	45 000	F			
Coût journalier du conducteur de la machine	Coût.m	1000	F/j			
Tonnage annuel traité par la machine					**50**	**t/an**
Calcul du coût d'utilisation horaire de la machine					**1 915**	**F/h**
Charges fixes						
Amortissement	A = PR / Nv			347 F	18%	
Intérêts du capital	Voir expli.			63 F	3%	
Réparations pièces et main d'œuvre	R = A * F.rép			139 F	7%	
Assurances et remisage	A * 2 %			7 F	0%	
Charges proportionnelles						
Consommation électricité	Puis.cons * Coût.kWh			640 F	33%	
Conduite personnel	Coût.m* Nbre.m/(Nh/j*Disp.			139 F	7%	
Coût de remplacement des lames	(C.lame/D.lame)*Dréel			88 F	5%	
Coût de remplacement des coquilles	(C.coq/D.coq)*Dréel			336 F	18%	
Coût de rechargement du rotor	(C.rotor/D.rotor)*Dréel			158 F	8%	
					100%	
Calcul du coût d'utilisation de la machine / kg de grain pré-décortiqué					**13,7**	**F/kg**