

Projet n° .AURG/2/161

Aval Fonio

Amélioration de l'après récolte et valorisation du fonio en Afrique

WORK PACKAGE 3

Amélioration des technologies de transformation et de stabilisation du fonio

Essais de validation des séchoirs

à flux traversant (CSec-T) et « serre solaire » (CSec-S)

(Rapport de mission au Sénégal du 2 au 10 mars 2015)



Auteur : Michel RIVIER (Cirad)

Mars 2015

Coordination du projet : Jean-François CRUZ (Cirad)

CIRAD (Centre de Coopération internationale en Recherche Agronomique pour le Développement - France)

ESP – UCAD (Ecole Supérieure Polytechnique – Université Cheick Anta Diop, Dakar, Sénégal)

Niveau de diffusion	
RE	Restreint à un groupe spécifié par la Coordination

Auteur :

- Michel RIVIER (1)

Ce travail a été réalisé en collaboration avec :

- Cheikh Mouhamed Fadel KEBE (2)
- Alkassoum ANNE (2)
- Abdoul DIALLO (2)
- Adji Madjiguene SOW (2)
- Ousmane WANE (2)
- Vincent SAMBOU (2)
- Jean Michel MEOT (1)

(1) Cirad (Centre de Coopération internationale en Recherche Agronomique pour le Développement)
UMR QualiSud, Département PERSYST, TA B-95/15, 73 rue Jean François Breton,
34398 Montpellier Cedex 5, France

(2) ESP – UCAD (École Supérieure Polytechnique – Université Cheick Anta Diop), Dakar, Sénégal

*Nota : Ce travail est soutenu financièrement par l'Union Africaine (procédure EuropeAid).
Il ne reflète pas nécessairement les vues et en aucun cas ne préfigure la politique future
de l'Union Africaine dans le domaine.*

1. Introduction	3
2. Le séchoir à flux traversant CSec-T	5
2.1. Présentation du séchoir CSec-T	5
2.2. État de la fabrication du séchoir CSec-T	6
2.3. Mise en œuvre des essais du séchoir CSec-T	7
2.4. Déroulement de l'essai de validation du séchoir CSec-T	7
2.5. Résultats obtenus lors de l'essai de validation du séchoir CSec-T	7
2.6. Proposition pour la poursuite d'essais du séchoir CSec-T	10
3. Le séchoir « serre solaire » CSec-S	10
3.1. Présentation du séchoir serre CSec-S	10
3.2. Mise en œuvre des essais du séchoir serre CSec-S	12
3.3. Déroulement des essais de validation du séchoir serre CSec-S	12
3.3.1. Mesure des conditions d'air dans le séchoir sans produit à sécher	12
3.3.2. Essai de séchage sur produit modèle	13
3.3.3. Essai de séchage sur produit modèle et sur fonio	15
3.4. Proposition pour la poursuite d'essais du séchoir CSec-S	18
4. Conclusion	19
Références bibliographiques	20

1. Introduction

Le fonio, céréale ancestrale d'Afrique de l'Ouest, est aujourd'hui valorisé sous la forme de fonio précuit. Il est ainsi commercialisé dans les boutiques de la sous-région ouest africaine ou même exporté en Europe ou aux États Unis

Les différentes étapes de la transformation du fonio paddy en fonio blanchi précuit sont caractérisées par les opérations unitaires suivantes : le nettoyage, le décorticage-blanchiment, le lavage-dessablage, la précuisson puis le séchage. Certaines opérations sont aujourd'hui mécanisées, notamment le nettoyage et le décorticage-blanchiment. Les équipements associés sont considérés comme des technologies matures : elles ont été testées en milieu contrôlé, validées sur sites de production agroalimentaire ; leur fabrication a aussi pu être transférée auprès d'équipementiers locaux en Afrique et leur diffusion se poursuit.

Lors des opérations de lavage-dessablage puis de précuisson, la teneur en eau du fonio s'élève d'une valeur de 10% (exprimée en basse humide, BH) à une valeur de l'ordre de 30/35% BH.

Le Cirad travaille depuis de nombreuses années sur le séchage de produits alimentaires (produits céréaliers, fruits, produits animaux) en Pays du Sud. Pour la mise en œuvre de cette opération, les travaux du Cirad réalisés au cours du précédent projet INCO Fonio ont abouti au développement de plusieurs types de séchoirs : le séchoir à flux traversant CSec-T et le séchoir « serre solaire » CSec-S pour les produits granuleux (couscous, fonio) en couche mince (Marouzé *et al.*, 2008). Par ailleurs, un séchoir à flux par léchage CSec-L a été mis au point pour les produits minces et à grande surface d'échange comme les tranches de fruits (Rivier *et al.*, 2009).

Les objectifs principaux des recherches sont de proposer, aux équipementiers et aux transformateurs locaux en Pays du Sud, des séchoirs fabricables localement avec des matériaux locaux, simples d'utilisation et de maintenance, et d'une efficacité énergétique la plus élevée possible.

Pour les séchoirs CSec-T et CSec-L, le principe d'une convection forcée (ventilateur) couplée à un apport d'énergie thermique a été adopté. Pour le séchoir serre CSec-S, l'énergie apportée pour l'évaporation de l'eau du produit à sécher est l'énergie solaire sous la forme de rayonnement avec très peu de convection.

Dans le cadre du projet Aval Fonio, l'activité 4 du WP3 a pour objet « *d'adapter et de valider des séchoirs pour les PME transformatrices de fonio* ». Il s'agit plus précisément de repartir des premiers prototypes réalisés par le précédent projet INCO Fonio pour les améliorer et valider scientifiquement leurs performances. On cherchera ensuite à les transférer pour réaliser des tests en milieu réel puis, à terme, à les faire fabriquer, tout ou partie, par des artisans locaux.

Au cours de l'année 2013, l'ESP-UCAD a réalisé des missions au Sénégal Oriental et à Kayes au Mali (Kébé *et al.*, 2013) et à Bamako (Kane et Anne, 2013) afin de rencontrer les opérateurs de la filière fonio (transformatrices, équipementiers) pour connaître l'expérience et l'avis des utilisateurs sur les séchoirs « serre solaire » et flux traversant et les besoins en séchage des petites entreprises de transformation du fonio.

Au cours de l'année 2014, un séchoir à flux traversant CSec-T a été fabriqué au Sénégal suivant les plans élaborés en 2008 (Marouzé, 2008) et actualisés en 2013. Ce séchoir a été assemblé à l'École Supérieure Polytechnique de l'Université Cheick Anta Diop (ESP-UCAD) de Dakar. Selon le cahier des charges établi en 2013 par le Cirad et l'ESP-UCAD, deux exemplaires du séchoir « serre solaire » CSec-S ont été commandés à la société FilClair (France) et livrés au Sénégal en octobre 2014 (Cruz, 2014). Un des séchoirs serre a été installé pour expérimentation sur le site de l'ESP-UCAD à Dakar.

Sur la base des propositions faites par le Cirad (J-M Méot) et l'ESP-UCAD (F.Kébé et V. Sambou), le séchoir à flux traversant (CSec-T) et le séchoir « serre solaire » (CSec-S) ont été instrumentés à l'occasion d'une mission d'appui effectuée par un expert (L. Biau) de la société française Siréa, en janvier 2015.

Ce rapport présente les tests expérimentaux de validation qui ont été réalisés en mars 2015 par les chercheurs et techniciens de l'ESP-UCAD de Dakar avec l'appui d'un chercheur du Cirad de Montpellier (M. Rivier).

3. Le séchoir « serre solaire » CSec-S

3.1. Présentation du séchoir serre CSec-S

Le séchoir serre est construit à partir d'une serre agricole d'une surface d'environ 90 m² (14 x 6,4 m) et d'un volume de 200 m³ (figure 2).

La serre, en journée ensoleillée, est soumise au rayonnement solaire qui après passage à travers le film plastique vient frapper le produit qui s'échauffe. Un petit apport de chaleur peut aussi avoir lieu par convection naturelle estimée à environ 5 W/(m².°C).

Des claies rectangulaires sont réalisées en bois avec un fond en treillis métallique ; elles sont suspendues aux arceaux de la serre (photo 3). Le fonio y est étalé sur un tissu ou une bâche de couleur sombre. Les claies ont les dimensions suivantes : 2,5 m x 1,5 m (soit 3,75 m²) avec quatre zones représentant une surface utile totale de 3,5 m².

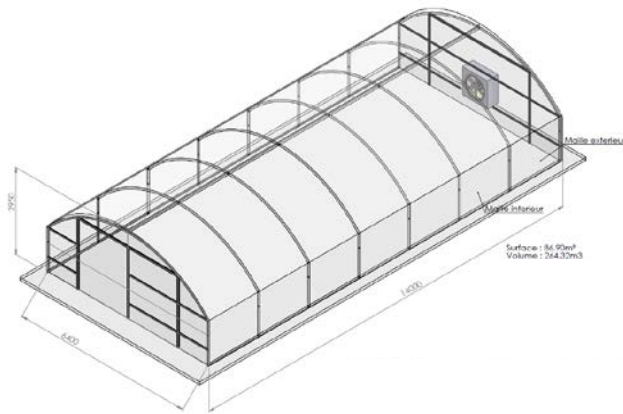


Figure 2. Schéma de la serre



Photo 3. Vue d'une claie suspendue aux arceaux de la serre

Le renouvellement de l'air est assuré lors de la mise en route d'un extracteur (ventilateur axial de puissance 400 W ; photo 4a) fixé sur un pignon de la serre et l'ouverture simultanée des volets mobiles installés sur le pignon opposé (photo 4b).

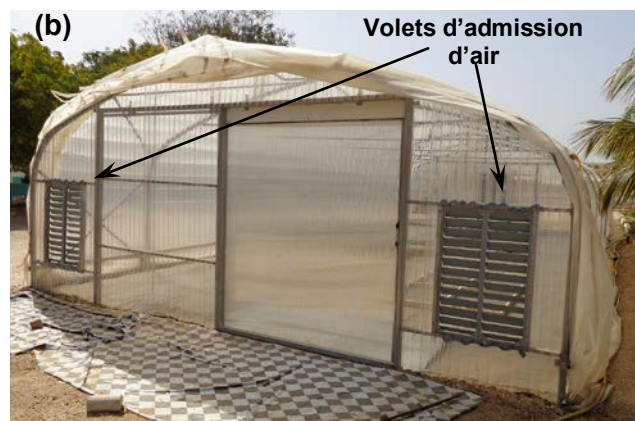


Photo 4. Vue des deux pignons de la serre avec extracteur (a) et volets mobiles (b)

3.2. Mise en œuvre des essais du séchoir serre CSec-S

Le séchoir serre est équipé de l'instrumentation suivante :

- treize capteurs thermomètre-hygromètre répartis sur toute la surface de la serre,
- un pyranomètre de mesure de la puissance du rayonnement solaire, positionné sur un mat à l'extérieur de la serre,
- une centrale d'acquisition des données relevées par les capteurs et le pyranomètre.

3.3. Déroulement des essais de validation du séchoir serre CSec-S

3.3.1. Mesure des conditions d'air dans le séchoir sans produit à sécher

Un premier essai de « prise en main » du séchoir, sans produit à sécher, a permis d'étudier le comportement de la serre tout au long d'une journée ensoleillée et de vérifier le bon fonctionnement de la chaîne de mesure (capteurs, centrale d'acquisition) et de l'extracteur. La puissance du rayonnement solaire sur la serre (exprimée en W/m^2), relevé par le pyranomètre, est présentée en figure 3.

Sur la même période de la journée, les températures et les humidités relatives de l'air à l'intérieur de la serre sont présentées sur la figure 4.

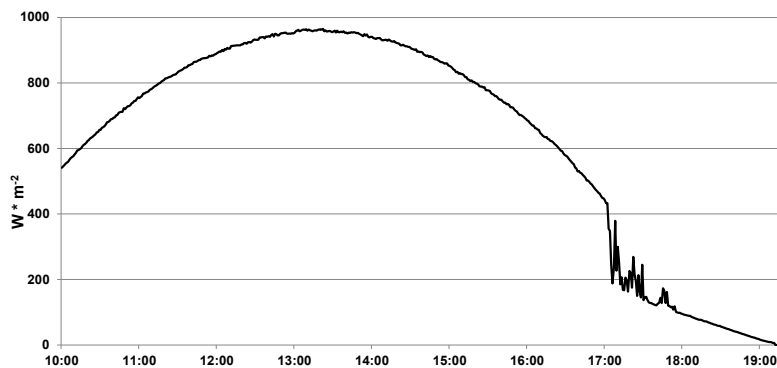


Figure 3. Puissance du rayonnement solaire sur la serre

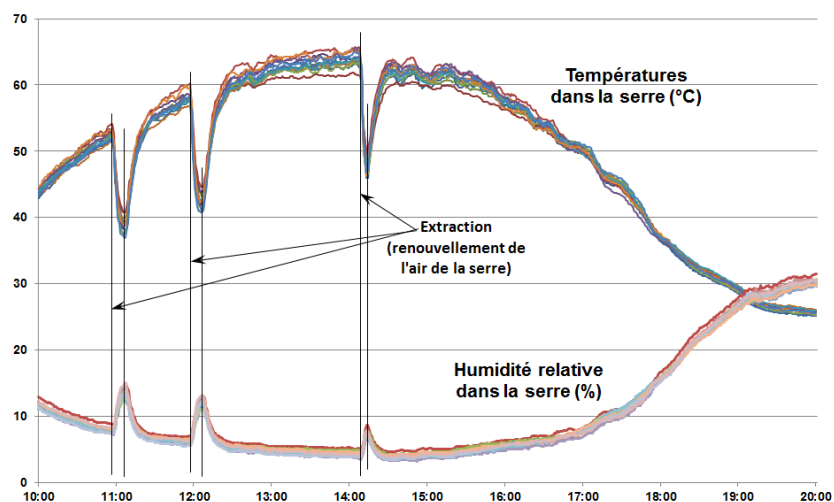


Figure 4. Températures et humidités relatives de l'air dans le séchoir serre

Les compléments d'informations sur cet essai sont les suivants :

- au cours de cette journée d'essai, aucun nuage n'est venu occulter le soleil jusqu'à 17h00, heure à partir de laquelle le rayonnement reçu par le pyranomètre est perturbé (figure 3),
- pour étudier l'effet du renouvellement d'air avec un apport d'air extérieur, l'extracteur a été mis en route pendant dix minutes à 11h00 et 12h00 et pendant 6 minutes à 14h00 (figure 4).
- les valeurs de température et d'humidité relative (HR) de l'air extérieur relevées sont présentées dans le tableau 4.

Heure	10h00	11h00	12h00	14h00	15h00	16h00	17h00	18h00
Température	27°C	29°C	33°C	32°C	31°C	34°C	29°C	27°C
HR	23%	20%	15%	10%	12%	9%	20%	25%

Tableau 4. Températures et humidités relatives de l'air extérieur

Cet essai conduit aux constats suivants :

- au plus fort ensoleillement de la journée, la puissance du rayonnement solaire sur la serre est proche de 1000 W/m². Au total, la puissance cumulée est de 6,1 kWh/m² sur cette journée (énergie incidente),
- la température maximale atteinte dans la serre est proche de 65°C, pour une température extérieur de 33°C,
- lors d'une mise en route de l'extracteur, la température de la serre chute de 15 à 20°C,
- les treize courbes issues des relevés des treize capteurs sont présentées sur la figure 4. Peu d'écart sont notés entre les valeurs des différents capteurs et en fonction de leur position. Pour la suite de la présentation des résultats, une seule courbe sera tracée avec les valeurs moyennes des valeurs des différents capteurs.

3.3.2. Essai de séchage sur produit modèle

Pour évaluer les performances du séchoir serre, un essai de séchage a été réalisé avec des serpillères imbibées d'eau.

Au total, 60 serpillères de 0,5 m² (soit 30 m² de surface de serpillères) ont été immergées dans des bassines d'eau et se sont imbibées de 31,7 kg d'eau (soit env. 1 kg d'eau par m² de surface). Elles ont été réparties sur 8 claies suspendues dans la serre (photo 5).

Des serpillères « témoins » ont été repérées, pesées régulièrement au cours de l'essai afin de suivre la cinétique et d'évaluer la fin du séchage.

La puissance du rayonnement solaire sur la serre est présentée en figure 5. Les températures et les humidités relatives de l'air à l'intérieur de la serre sont présentées respectivement sur les figures 6 et 7.

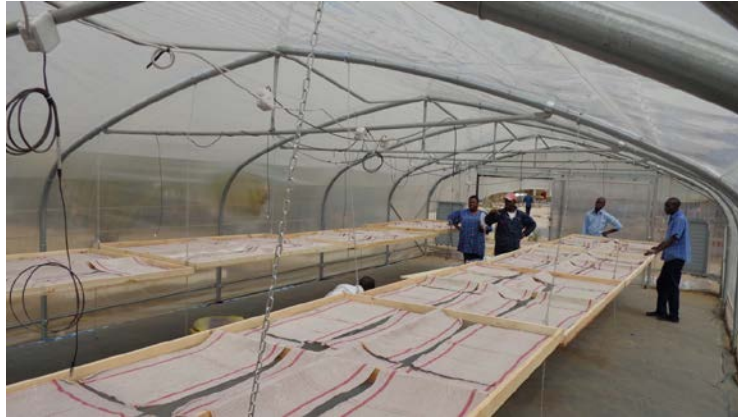


Photo 5. Vue des serpilières positionnées sur les 8 claies suspendues

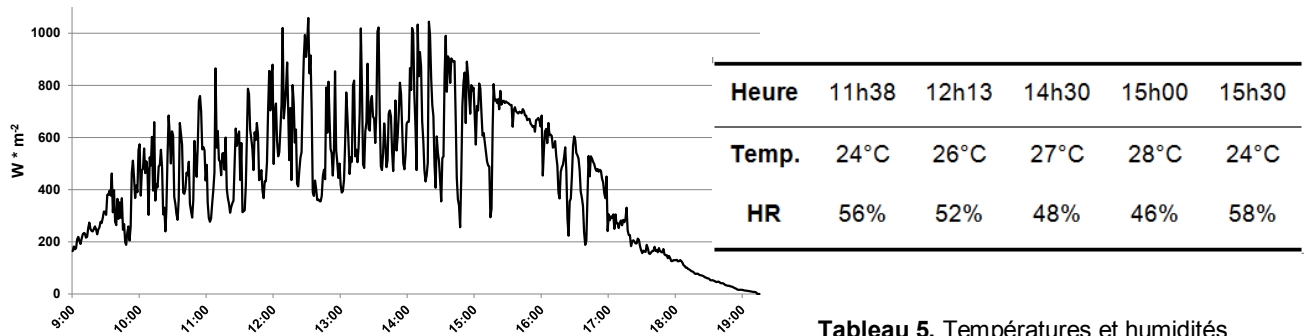


Figure 5. Puissance du rayonnement solaire sur la serre

Tableau 5. Températures et humidités relatives de l'air extérieur

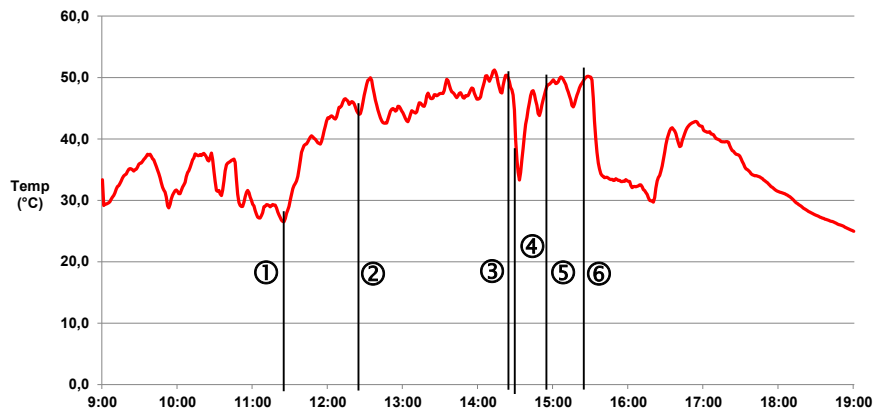


Figure 6. Évolution de la température dans la serre en essai de séchage de serpilières

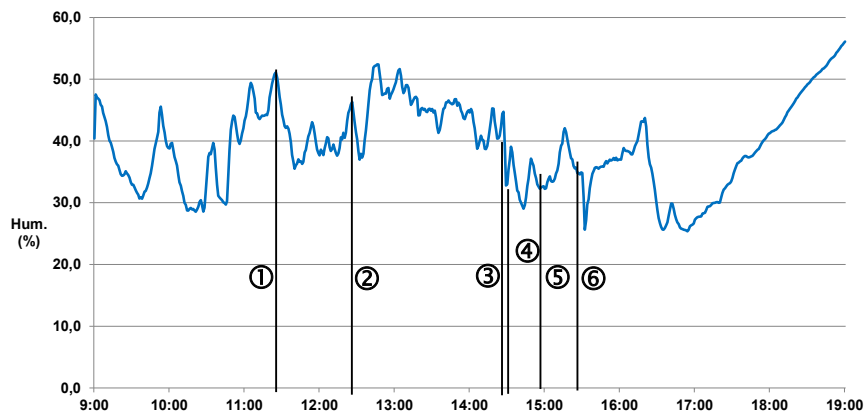


Figure 7. Évolution de l'humidité relative dans la serre lors de l'essai de séchage de serpilières

Au cours de cette journée d'essai, le temps a été variable avec une alternance de soleil et d'entrées maritimes avec passages nuageux. La courbe en figure 5, de mesure de la puissance du rayonnement solaire est ainsi très irrégulière. La puissance maximale atteinte a été de l'ordre de 1000 W/m² entre 12h00 et 14h00. À cette heure-là, la température de l'air extérieur maximale atteinte est de 28°C ; l'humidité relative de l'air extérieur a été élevée, toujours au-delà de 45% (tableau 5).

Le chargement des claies de la serre en serpillères mouillées a été terminé à 11h30 (repère① figures 6 et 7). À 12h30 et 14h30 (repères② et ③), les opérateurs sont entrés dans la serre pour faire une pesée des serpillères « témoins ». À 14h30 (repère③) et pendant 5 minutes (repère④), l'extracteur a été mis en route pour renouveler l'air en vue d'abaisser sa teneur en eau. Une nouvelle pesée a été réalisée à 15h00 (repère⑤) ; la fin de la période de séchage a été décidée pour 15h30 (repère⑥), heure à laquelle la porte de la serre a été ouverte et l'extracteur mis en route quelques minutes.

La pesée de l'ensemble des serpillères apporte l'information d'une perte en eau de 29,8 kg d'eau (tableau 6).

Heure de début de séchage	11h30
Heure de fin de séchage	15h30
Durée du séchage	4h00
Quantité d'eau évacuée	29,8 kg

Tableau 6. Données principales de l'essai de séchage du produit modèle

Au cours de cet essai, la quantité d'eau évacuée est ainsi de 1kg/m² de surface de séchage. La température dans la serre a été au maximum de 50°C (figure 6), valeur inférieure de 15°C à celle relevée (65°C) lors de l'essai sans produit (figure 4). Cette chute de température est en grande partie due à la quantité d'énergie absorbée par le séchage. L'humidité relative de l'air a été rarement au-delà de 50%.

Une très bonne homogénéité de séchage a été constatée entre les différentes claies (par la pesée des serpillères témoins).

3.3.3. Essai de séchage sur produit modèle et sur fonio

Pour vérifier que le séchage du fonio précuit se déroule de façon identique à celui des serpillères, un nouvel essai a été mis en œuvre. Sur les huit claies du séchoir serre, deux ont été chargées avec du fonio précuit (figure 8 et photo 6).

Six claies ont été chargées avec 45 serpillères de 0,5 m² (soit 22,5 m² de surface de serpillères) imbibées d'eau (figure 8 et photo 6). Celles-ci sont, au total, imbibées de 25,95 kg d'eau (soit un peu plus de 1 kg d'eau par m² de surface).

Un lot de fonio précuit sec, de teneur en eau à 10% BH a été porté à une valeur de 30% BH avec l'apport de la quantité d'eau nécessaire. La quantité totale de fonio humide à disposer sur claies a été calculée afin que la quantité d'eau à perdre soit également proche de 1kg/m² de claie. Les deux claies ont été chargées de 15,64 kg et 15,73 kg de fonio humide. Les quantités d'eau cibles à perdre, sur ces deux claies pour avoir un fonio sec à 10% BH, sont respectivement de 3,47 kg et 3,49 kg.

Des serpillères « témoins » et un compartiment de fonio « témoin » par claie ont été repérés, pesés régulièrement au cours de l'essai afin de suivre la cinétique et d'évaluer la fin du séchage.

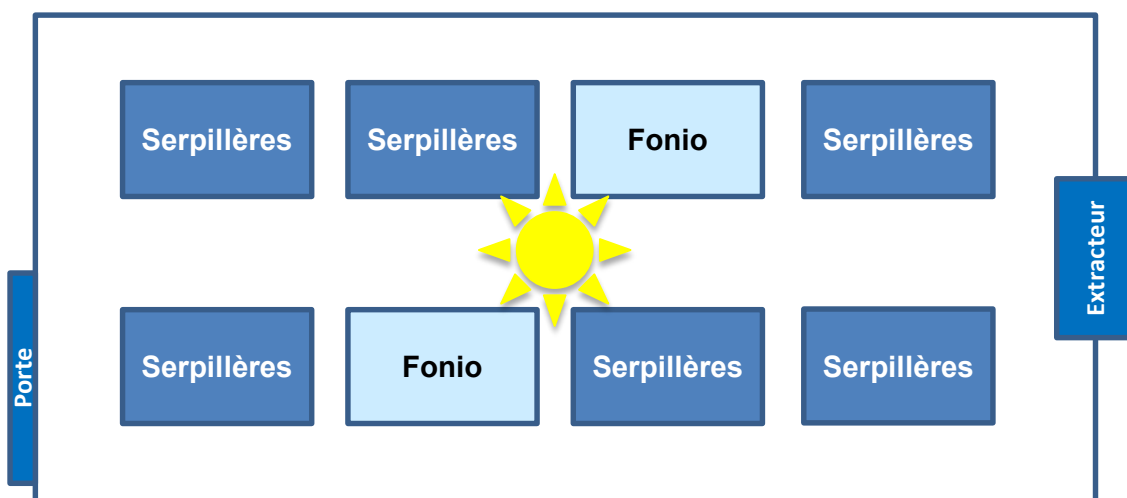


Figure 8. Disposition des claies dans le séchoir serre

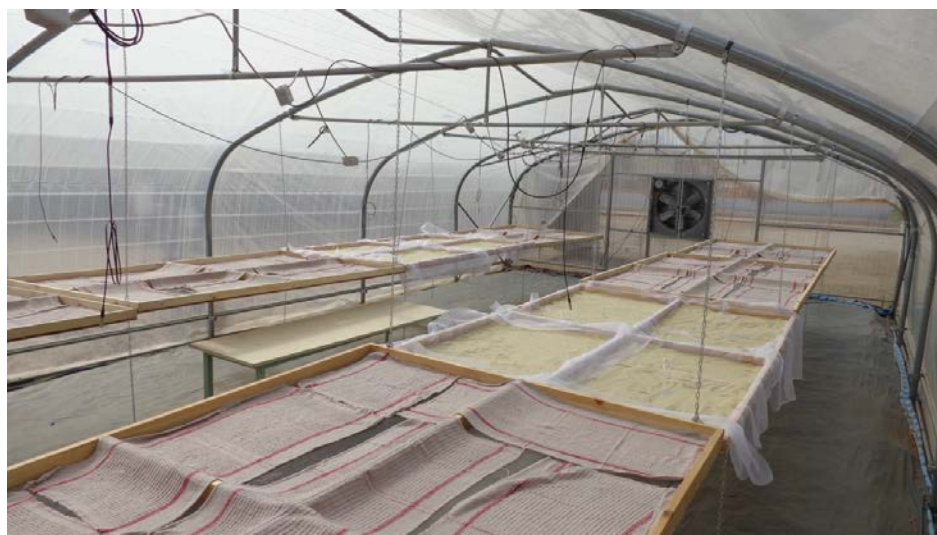


Photo 6. Vue des 8 claies suspendues dans le séchoir serre

La puissance du rayonnement solaire sur la serre est présentée en figure 9. Les températures et les humidités relatives et absolues de l'air à l'intérieur de la serre sont présentées en figure 10.

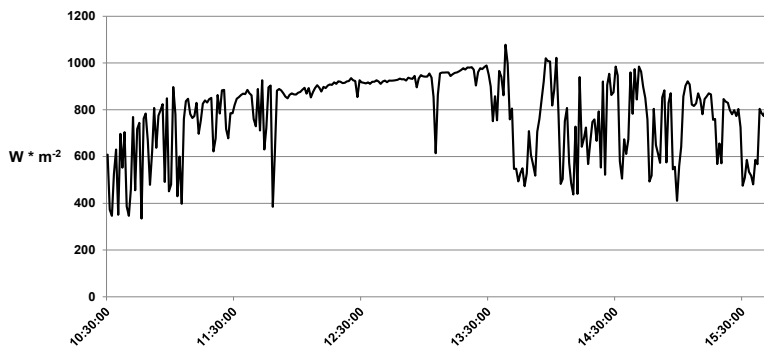


Figure 9. Puissance du rayonnement solaire sur la serre

Heure	10h39	11h39	12h32	13h32	15h09
Temp.	25°C	27°C	25°C	26°C	25°C
HR	49%	48%	50%	48%	49%

Tableau 7. Températures et humidités relatives de l'air extérieur

Comme au cours de l'essai précédent, le temps a été variable avec une alternance de soleil et d'entrées maritimes avec passages nuageux. La courbe en figure 9 (puissance du rayonnement solaire) est ainsi très irrégulière, moins entre 12h00 et 13h30, période au cours de laquelle les nuages ont été moins présents.

La puissance maximale atteinte a été de l'ordre de 1000 W/m² vers 13h30. Les valeurs de température et d'humidité relative de l'air extérieur sont présentées sur le tableau 7.

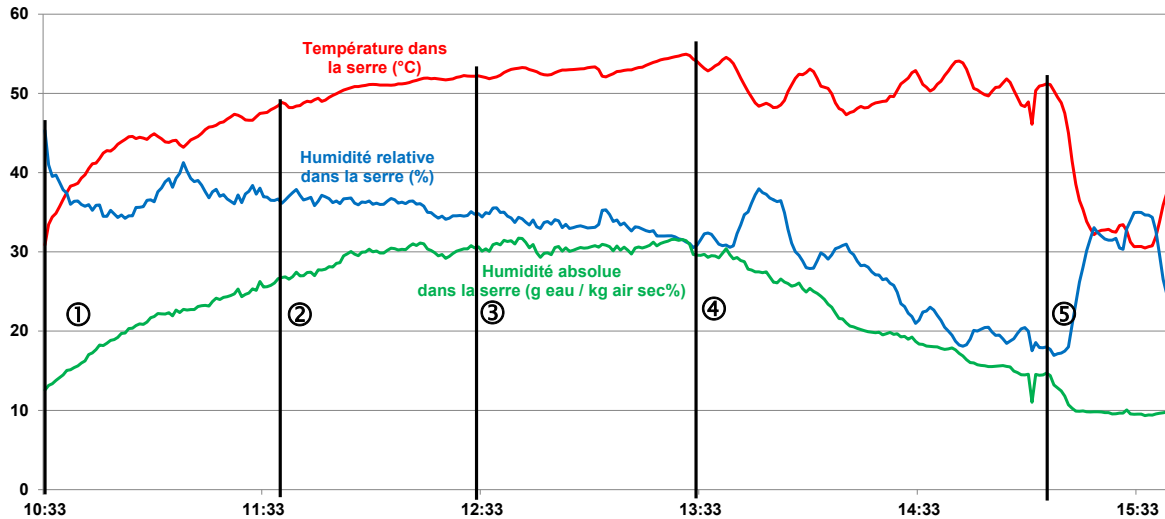


Figure 10. Évolution de la température, des humidités relative et absolue dans la serre lors de l'essai de séchage de serpillères et de fonio

Le chargement des claies a été terminé à 10h33 (repère ① fig. 10). À 11h39, 12h32 et 13h32 (repères ②, ③ et ④), les opérateurs sont rentrés dans la serre pour faire une pesée des serpillères et des compartiments de fonio « témoins ». La fin de la période de séchage a été décidée pour 15h03 (repère ⑤), heure à laquelle la porte de la serre a été ouverte et l'extracteur mis en route quelques minutes.

La pesée de l'ensemble des serpillères et du fonio apporte l'information d'une perte en eau totale de 33,3 kg d'eau (tableau 8) : 26,1 kg pour les serpillères et 7,2 kg pour le fonio. Ces quantités d'eau sont légèrement plus importantes que celles introduites, a priori suite à un sur-séchage (les serpillères, elles aussi, contenaient encore un peu d'eau de l'essai précédent lors de leur pesée avant immersion dans l'eau).

Heure de début de séchage	10h33
Heure de fin de séchage	15h03
Durée du séchage	4h30
Quantité d'eau évacuée	33,3 kg

Tableau 8. Données principales de l'essai de séchage de serpillères et du fonio

La température dans la serre a été au maximum de 55°C (figure 10). Au cours de cet essai, il n'y a pas de renouvellement de l'air par la mise en route de l'extracteur.

L'humidité absolue de l'air est passée d'une valeur de 12 g d'eau / kg d'air en début de séchage à une valeur de 30 g d'eau / kg d'air au bout de 1h30 pour s'y maintenir jusqu'à la fin de la 3^{ème} heure. Ce « plateau » dans les valeurs d'humidité absolue, alors que la température de l'air augmente (et que l'humidité relative baisse) conduit à penser qu'un léger renouvellement d'air s'est fait dans la serre à travers des fuites en fond de serre ou au niveau des volets et de l'extracteur. Au bout de la 3^{ème} heure, un abaissement des humidités absolue et relative de l'air (pour une température quasi constante) s'explique par le ralentissement de la vitesse de séchage.

Une très bonne homogénéité de séchage a été observée entre les différentes claies, que ce soit pour les serpillères ou pour le fonio.

3.4. Proposition pour la poursuite d'essais du séchoir CSec-T

Pour confirmer ces premiers résultats, l'équipe de l'ESP Dakar doit poursuivre des essais en augmentant la charge du séchoir en fonio humide. En particulier, il a été constaté que les claies pouvaient recevoir au moins deux fois plus de produit. En augmentant également le nombre de claies (2 nouvelles claies du séchoir CSec-S et les 12 claies du séchoir CSec-T) selon la répartition présentée en figure 11, c'est une quantité de près de 400 kg de fonio précuit à 30% BH de teneur en eau (90 kg d'eau à enlever) qui pourrait être séchée.

Pour cette capacité de séchage, il faudra porter une attention particulière à l'évolution de l'humidité dans la serre, la quantité d'eau à extraire étant trois fois plus importante, et le cas échéant vérifier les effets d'un renouvellement d'air.

Pour mesurer l'énergie utile pratique, il sera important de rajouter un deuxième pyranomètre dans le séchoir serre, au niveau du fonio à sécher, afin de faire la mesure de rayonnement

solaire en comparaison de la valeur du rayonnement en extérieur. Les pertes d'énergie directe lors de la traversée du film de la serre pourront ainsi être estimées.

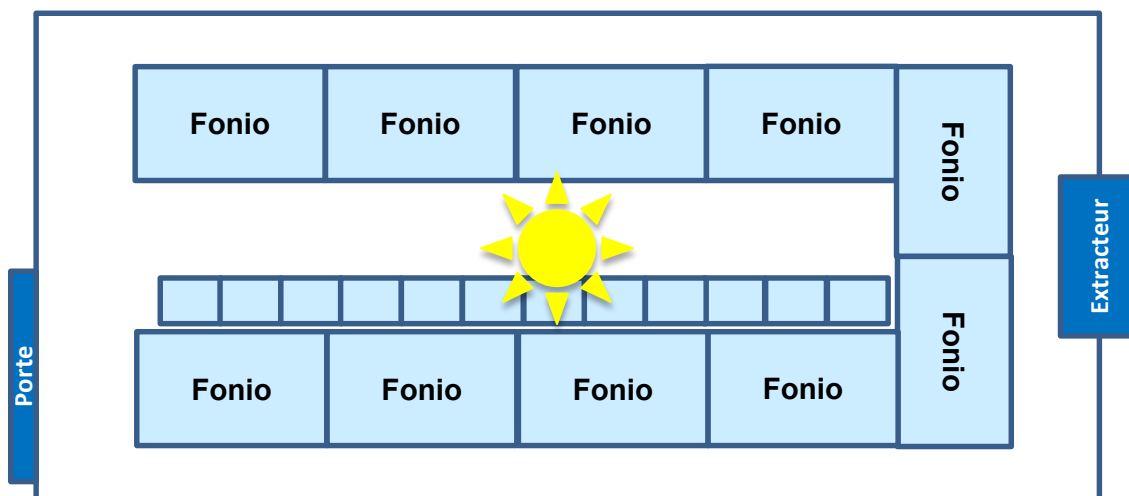


Figure 11. Disposition des claies dans la serre pour un essai de séchage de 400 kg de fonio

4. Conclusion générale

Le séchoir CSec-T a été fabriqué dans de bonnes conditions. Les essais ont permis de transférer des connaissances spécifiques à la fois au constructeur et aux chercheurs et techniciens de l'ESP-UCAD. Ils ont eu l'intérêt de pouvoir adapter les paramètres de pilotage du séchoir à la densité et aux caractéristiques dimensionnelles du fonio précuit et de valider les performances de ce séchoir à savoir i / un débit de séchage 27 à 36 kg/h en fonio précuit et ii/ une consommation thermique spécifique de 5550 kJ/kg d'eau extraite. Ces nouvelles connaissances seront fort utiles lors de la diffusion du séchoir CSec-T. En effet, en fonction de la capacité de production propre à une entreprise intéressée par son acquisition, il est aujourd'hui possible d'optimiser sa structure (dimensions, nombre de colonnes, ...), ses composants (ventilateur, brûleur, ...) et sa conduite pour aller vers un prix de revient et un coût de fonctionnement réduits.

L'instrumentation du séchoir CSec-S, telle qu'elle a été prévue dans le cadre de ce projet, a permis de réaliser un suivi précis des essais de séchage et d'apprécier les performances du séchoir serre. Si les essais complémentaires prévus à Dakar, puis en milieu réel de production au Sénégal Oriental, confirment les premiers résultats, ce séchoir « serre solaire » sera parfaitement validé. Il permettra ainsi de sécher à l'énergie solaire environ 400 kg de fonio précuit par jour ce qui correspond aux besoins actuels de certaines entreprises de transformation du fonio parmi les plus performantes.

Références bibliographiques

Cruz J-F .2014. Amélioration de l'après récolte et valorisation du fonio en Afrique. Projet AvalFonio. Rapport annuel 2014. Cirad, Montpellier. 36 p.

Kane C., Anne A. 2013. Rapport de mission au Mali. Amélioration de l'après récolte et valorisation du fonio en Afrique, projet Aval Fonio. ESP-UCAD, Dakar, Sénégal. 13 p.

Kébé C.M.F., Cissé M., Ayessou N. 2013. Compte-rendu de mission à Salémata, Kédougou et Kayes. Amélioration de l'après récolte et valorisation du fonio en Afrique, projet Aval Fonio. ESP-UCAD, Dakar, Sénégal. 11 p.

Rivier M., Méot J-M., Ferré T., Briard M. 2009. Le séchage des mangues. Guide pratique. Editions Quae, Versailles, France. 109 p.

Marouzé C., Cruz J-F., Rivier M. 2008. Equipements pour le séchage du fonio *In* Qualité et compétitivité du fonio en Afrique de l'Ouest, Ed.Cruz *et al.* Projet INCO Fonio. Cédérom Cirad, 2011. 10 p.

Marouzé C. 2008. Plans de fabrication des équipements de séchage du fonio *In* Qualité et compétitivité du fonio en Afrique de l'Ouest, Ed.Cruz *et al.* Projet INCO Fonio. Cédérom Cirad, 2011. 38 p.