

## Projet INCO-Fonio

“Amélioration de la qualité et de la compétitivité de la filière fonio  
en Afrique de l’Ouest”

WP1- Activité 3 :  
Équipements de séchage de fonio  
Année 2006

Compte rendu des travaux du CIRAD  
Réalisés en collaboration de l'IER

CIRAD dépt PERSYST

UMR Qualisud

C. Marouzé

Avec la participation de D. Dramé

Janvier 2007

CIRAD-DIST  
Unité bibliothèque  
Lavalette

**27 MARS 2008**



\*000099579\*

DK-548928.

## **Projet INCO-Fonio**

“Amélioration de la qualité et de la compétitivité de la filière fonio  
en Afrique de l’Ouest”

WPI- Activité 3 :  
Équipements de séchage de fonio  
Année 2006

Compte rendu des travaux du CIRAD  
Réalisés en collaboration de l'IER

CIRAD  
UMR ITAP  
C. Marouzé  
Avec la participation de D. Dramé  
Janvier 2007

# Sommaire

<b>I.</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>2</b>
<b>II.</b>	<b>Présentation du séchoir à flux traversant</b> .....	<b>2</b>
	1. <i>Principe de fonctionnement</i> .....	3
	2. <i>Description de l'enceinte de séchage</i> .....	3
	3. <i>Dispositif de chauffage de l'air et de ventilation</i> .....	4
	4. <i>Dimensionnement du séchoir et réalisation des plans</i> .....	4
	5. <i>Fabrication locale</i> .....	5
	6. <i>Caractérisation du ventilateur</i> .....	6
	7. <i>Caractérisation du circuit d'air à vide</i> .....	7
<b>III.</b>	<b>Expérimentation du séchoir flux traversant</b> .....	<b>8</b>
	1. <i>Essai du 17 11 06</i> .....	8
	2. <i>Essai du 20 11 06</i> .....	8
	3. <i>Essai du 21 11 06</i> .....	9
	4. <i>Essai du 22 11 06</i> .....	10
	5. <i>Essai du 24 11 06</i> .....	10
	6. <i>Evaluation du coût de fonctionnement</i> .....	11
	7. <i>Conclusion des essais du séchoir à flux traversant</i> .....	11
<b>IV.</b>	<b>Séchoir serre</b> .....	<b>13</b>
	1. <i>Principe et description</i> .....	13
	2. <i>Réalisation du séchoir serre</i> .....	13
	3. <i>Essai à vide du 23 11 06</i> .....	14
	4. <i>Essai en charge les 23 et 24 11 06</i> .....	15
	5. <i>Evaluation du coût d'utilisation du séchoir serre</i> .....	17
	6. <i>Conclusion sur le séchoir serre</i> .....	18
<b>V.</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>18</b>
	<b>Délivrables de l'activité</b> .....	<b>18</b>
	<b>Références</b> .....	<b>18</b>
	<b>Annexes</b>	

## I. Introduction

Le Cirad travaille depuis de nombreuses années sur le séchage de produits alimentaires dans les pays en développement et plus particulièrement pour les pays d'Afrique de l'Ouest. Les travaux récents ont conduit au développement de deux type de séchoirs : le séchoir à flux traversant et le séchoir serre. Ces deux principes de séchoirs avaient été proposés au début du projet CFC-Fonio dans le cadre des travaux sur le séchage (Marouzé, Touaoro and Gibert 2001) mais sans suite car les partenaires avaient estimé que les séchoirs existant pouvaient répondre aux demandes des transformatrices. Ces séchoirs (Atesta et FAC 2000 pour les séchoirs à gaz et séchoir Banco, séchoir solaire pliable pour les séchoirs solaires) ont été testés durant ce projet mais ont montré des points faibles (Dramé, Wereme, Sakho et al. 2005). L'augmentation du prix du gaz conduit de nombreuses transformatrices à abandonner l'usage de ces séchoirs à gaz alors qu'elles en étaient propriétaires. Les séchoirs solaires ont de faible capacité et des durées de séchage importantes

Les travaux de recherche du Cirad ont pour objectifs de développer des équipements efficaces énergétiquement pour réduire autant que faire se peut le coût énergétique qui est le poste principal de dépenses pour l'opération de séchage. Le choix d'une ventilation dynamique de l'air favorise autant que faire se peut l'échange entre l'air chaud et le produit à sécher. Les travaux réalisés dans le cadre du projet INCO-Fonio sur le volet séchage du fonio visent à :

- Compléter l'étude théorique pour dimensionner les séchoirs pour le fonio,
- Etudier la fabrication locale,
- Dessiner les séchoirs,
- Les faire réaliser et en vérifier la bonne fabrication,
- Réaliser les essais en conditions réelles,
- Evaluer les performances en vue de lancer leur diffusion.

### Périodes de missions

- Une première mission a été réalisée à Bamako du 16 au 21 juillet 2006 pour assurer le lancement de la fabrication des séchoirs,
- Une deuxième mission du 13 au 24 novembre a permis de finaliser la construction des séchoirs et d'en assurer les essais.

## II. Présentation du séchoir à flux traversant

Le séchoir à flux traversant a été développé par le Cirad avec des tamis circulaires superposés (Baka N'Guessan 1999; Ursule 2001) puis une étude détaillée a été réalisée à l'aide d'une maquette comportant des claies-tiroirs (Gomez Eslava 2005). A partir de cette disposition un premier séchoir comportant 3 cellules a été réalisé et testé au Burkina Faso (Méot and Marouzé 2005).

## 1. Principe de fonctionnement

Ce principe de séchage a été développé pour les produits solides de type produits granulés (couscous) ou sous forme de graines ou de morceaux. Il faut que le flux d'air puisse traverser la masse de produit sans la déplacer, ce principe ne convient pas pour les farines ou les produits comportant une part de farines.

Le principe du séchoir à flux traversant est de créer un mouvement à contre courant entre d'une part, le flux d'air chaud qui va de bas en haut et d'autre part, le produit qui descend par étapes depuis la position 4 des claies jusqu'à la position 1. Dans ce principe, le flux d'air chaud traverse la masse de produit pour favoriser l'échange air-produit. Ces deux principes (contre courant et air traversant la masse de produit) permettent d'avoir une très bonne efficacité énergétique donc une moindre consommation de combustible ; l'air sortant du séchoir est saturé en eau ce qui exploite au mieux la capacité évaporatoire de l'air d'entraînement. Le séchoir comporte un dispositif de chauffage et de ventilation de l'air et une enceinte d'échange entre l'air chaud et le produit.

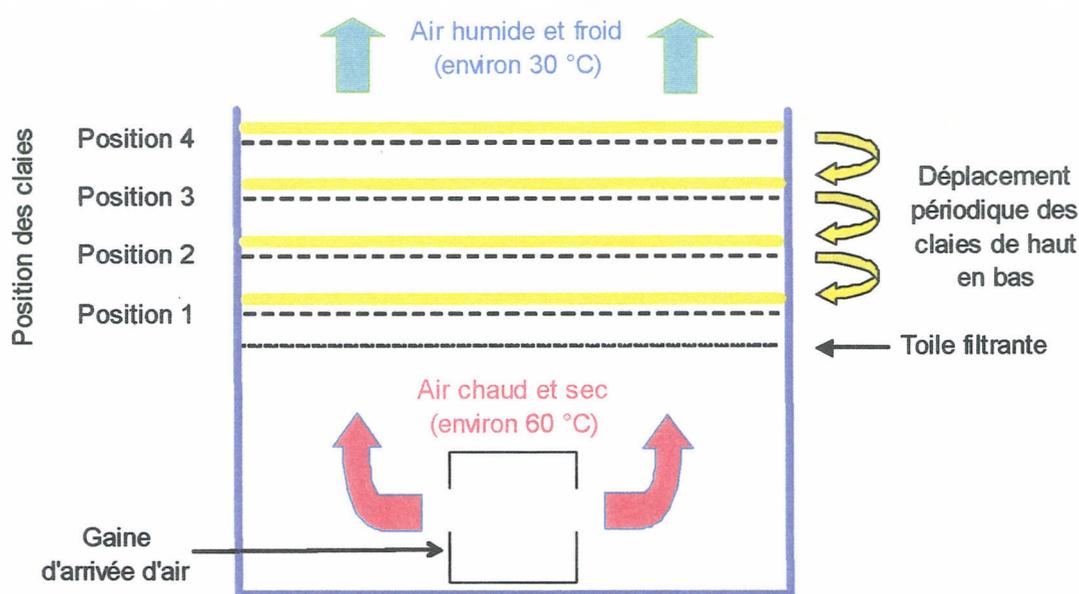


Fig. 1 : Schéma de principe du séchoir à flux traversant (coupe de l'enceinte).

## 2. Description de l'enceinte de séchage

Le séchoir comporte 3 cellules contenant chacune 4 claies superposées. Pour mettre en œuvre le principe, nous avons retenu pour les claies, le principe du tiroir posé sur un support horizontal qui est introduit et extrait horizontalement du séchoir. Les claies sont rectangulaires. Le mouvement à contre courant est obtenu par permutation des claies ; la claie avec le produit humide est placée en position supérieure, au bout d'un cycle de permutation, elle est descendue d'un niveau, à la permutation suivante elle est de nouveau descendue d'un niveau et au dernier cycle elle est placée en position basse où le produit est attaqué par de l'air chaud et sec. Cette disposition nécessite la présence d'une personne pour réaliser périodiquement l'enlèvement de la claie basse, la permutation manuelle des claies en commençant par le bas et la mise en place de la claie supérieure mais cette disposition assure une grande simplicité de fabrication.

L'air chaud est introduit par une conduite métallique sous les claies et couvrant les 3 cellules (voir figure 1). Deux perçages sont réalisés de part et d'autre de la conduite au niveau

de chaque cellule. Les jets d'air dirigés horizontalement sont « cassés » par les parois pour éviter les passages préférentiels d'air au niveau des claies. La perte de charge créée par ces ouvertures répartit l'air entre les trois cellules. Enfin, un cadre revêtu d'un filtre est placé sous les claies pour retenir les poussières éventuellement présentes dans l'air. L'air introduit à la partie basse d'une cellule se répartit sur l'ensemble de la surface de la claie du fait de la perte de charge qu'il crée en traversant le produit.

Chaque compartiment est équipé d'une porte qui donne accès aux claies. Celles-ci sont constituées d'un cadre bas, d'un grillage métallique galvanisé de maille 5 \* 5 mm supporté par des raidisseurs, et d'un cadre haut pour contenir le produit. Le produit est disposé sur un tissu type rideau débordant d'environ 15 cm sur chaque bord de la claie. Ce tissu permet de contenir le produit, de le récupérer pour le sortir de la claie ou pour le mélanger. Il peut être lavé.

### 3. Dispositif de chauffage de l'air et de ventilation

L'enceinte de séchage est alimentée en air chaud par un ensemble composé :

- D'un caisson de chauffage qui utilise un brûleur à gaz de 8 kW,
- Et d'un ventilateur de type ventilateur centrifuge monté directement sur l'axe d'un moteur électrique.

Le circuit d'air dans le caisson provoque un mélange de l'air frais provenant de l'extérieur et de l'air chaud issu du brûleur (voir fig. 2). Une tôle verticale empêche la montée du flux d'air chaud vers le ventilateur quand celui-ci ne fonctionne pas (par exemple en cas de coupure de courant). Une vanne est placée entre le caisson et le ventilateur, elle assure le réglage du débit d'air en fonction de la nature du produit à sécher, plus les granules sont gros plus la vitesse d'air donc le débit peuvent être importants.

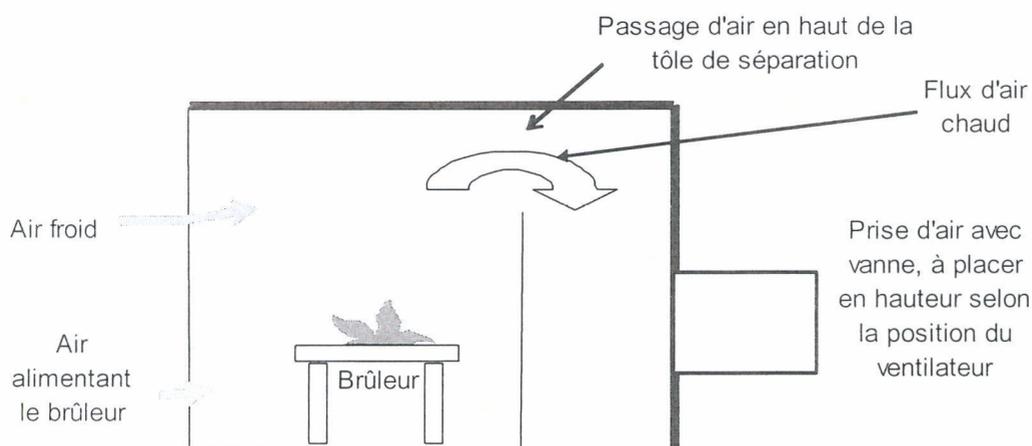


Fig. 2 : Principe du caisson du brûleur et du mélange d'air

### 4. Dimensionnement du séchoir et réalisation des plans

Le dimensionnement du séchoir a été conduit pour le séchage du fonio mais aussi pour celui des autres produits granulés tels que le couscous. Pour le fonio, des vitesses d'air entre 0.17 et 0.3 m/s à l'attaque des claies sont donc recherchées. Par rapport au modèle du Burkina, la surface des claies a été légèrement augmentée pour accroître la capacité. La principale difficulté est de limiter les pertes de charges du circuit aéraulique pour utiliser un ventilateur basse pression.

Les plans des cellules du séchoir ont été réalisés en fonction des choix de fabrication et pour une construction tout en bois ou une construction avec une embase maçonnée et pour un ventilateur avec moteur de 1500 ou 3000 tr/min. C'est la version avec embase maçonnée et moteur de 3000 tr/min qui a été retenue.

## **5. Fabrication locale**

### *5.1. Choix des modes de fabrication*

La fabrication a été assurée par Mod-Engineering à Bamako. Il a été décidé de privilégier les matériaux et les modes de fabrication suivants :

- Le bois (plaques et chevons) pour toute la partie haute des cellules car cette technologie est bien maîtrisée par les artisans locaux et les températures de l'air dans cette zone ne sont pas trop élevées ;
- Le métal (tôle) pour le circuit d'air chaud jusqu'à la gaine car la température de l'air peut y être élevée surtout si un incident réduit le débit d'air ce qui augmente d'autant sa température. Le métal permet d'avoir une bonne étanchéité évitant les fuites d'air chaud ;
- Maçonnerie pour la partie basse de l'enceinte car c'est une solution économique assurant une bonne isolation thermique.

### *5.2. Modifications durant la fabrication*

Une table de cuisson de cuisine 4 feux de 8 kW a été utilisée au lieu d'un brûleur simple feu car ce dernier n'était pas disponible avec une sécurité de présence de flamme chez le fournisseur. La puissance de ce brûleur est modulable de 1 à 8 kW. Ceci a entraîné une augmentation de la largeur du caisson de chauffage. Avant la réalisation des modifications, il été constaté un débit d'air un peu faible (environ 850 m<sup>3</sup>/h) à cause de la perte de charges à la sortie du ventilateur (diamètre 90 mm).

Caisson de chauffage d'air :

- Enlever la casquette pour avoir une meilleure vision des brûleurs ;
- Faire une isolation du caisson pour éviter les parois chaudes. Dans un premier temps, il a été retenu le doublage des tôles acier pour faire des mesures de températures de parois ;
- Refaire la conduite entre le caisson et le ventilateur avec un diamètre de conduite de 180 mm (au lieu de 120 mm) pour permettre un meilleur passage de l'air et la trappe de réglage de débit qui n'avait pas été faite.

Ensemble ventilateur – conduite d'air :

- Refaire l'ouïe d'aspiration du ventilateur au diamètre 180 mm.
- Refaire entièrement la sortie du ventilateur jusqu'à la bride de raccordement à la gaine pour supprimer l'étranglement de la conduite de 90 mm.
- Faire la prise de pression.

Cellule de séchage :

- Réduire la largeur des portes pour éviter leur déformation et leur blocage en saison des pluies avec l'humidité,
- Faire une contre plaque sur les portes qui fasse en même temps couvre joint pour éviter les fuites d'air,
- Mettre des aimants et des poignées à la place des verrous de portes,
- Maçonnerie : faire les étanchéités entre la gaine et la maçonnerie,
- Faire les cadres filtre. Ces cadres ont été revêtus d'une mousse d'épaisseur un centimètre (type filtre à air) recouvert d'un tissu. La mousse et le tissu sont collés et cloués (voir photos)

## 6. Caractérisation du ventilateur

	Dimensions réelles		Dimensions plans	
Ventilateur	2850	tr/min	2850	tr/min
Diamètre	222	mm	225	mm
Largeur	92	mm	100	mm

Tabl. 1 : Caractéristiques du ventilateur

Position vanne	Débit total (m <sup>3</sup> /h)	Pression statique, mesures du 20 11 06 (mm CE)		
		Aspiration	Refolement	Total
0	1280	-9,5	5,5	15
1	#N/A	-15	5	20
2	1112	-33	5	38
3	801	-55	2	57
4	713	-55	2	57

Tabl. 2 : Pression du ventilateur et du circuit d'air à vide

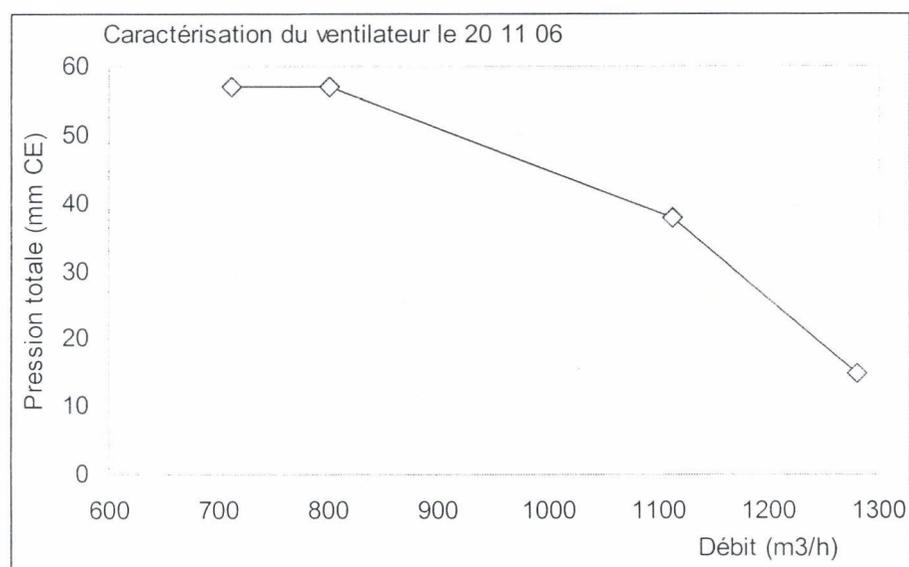


Fig. 3 : Courbe caractéristique du ventilateur après sa modification

Bien que les dimensions de la roue de ventilateur aient été légèrement réduites, les débit à vide du ventilateur est de 1280 m<sup>3</sup>/h soit une vitesse d'air à l'attaque des claies (870 x 550 mm de dimension intérieures) de 0,247 m/s et la pression maximale du ventilateur est de 57 mm de CE pour un débit de 800 m<sup>3</sup>/h.

### 7. Caractérisation du circuit d'air à vide

	Cel 1	Cel 2	Cel 3	Débit total
Position 0	418	425	437	1280
Ecart de débit / au + Important	96%	97%	100%	
Position 2	351	382	380	1112
Position 3	251	275	275	801
Position 4	203	253	257	713
Ecart de débit / au + Important pour l'ensemble	91%	99%	100%	

Tabl. 3 : Débit d'air (en m<sup>3</sup>/h) pour chaque cellule et pour les différentes positions de la trappe de réglage de débit

Le tableau ci-dessus montre que la répartition de débit d'air entre les cellules est satisfaisante.

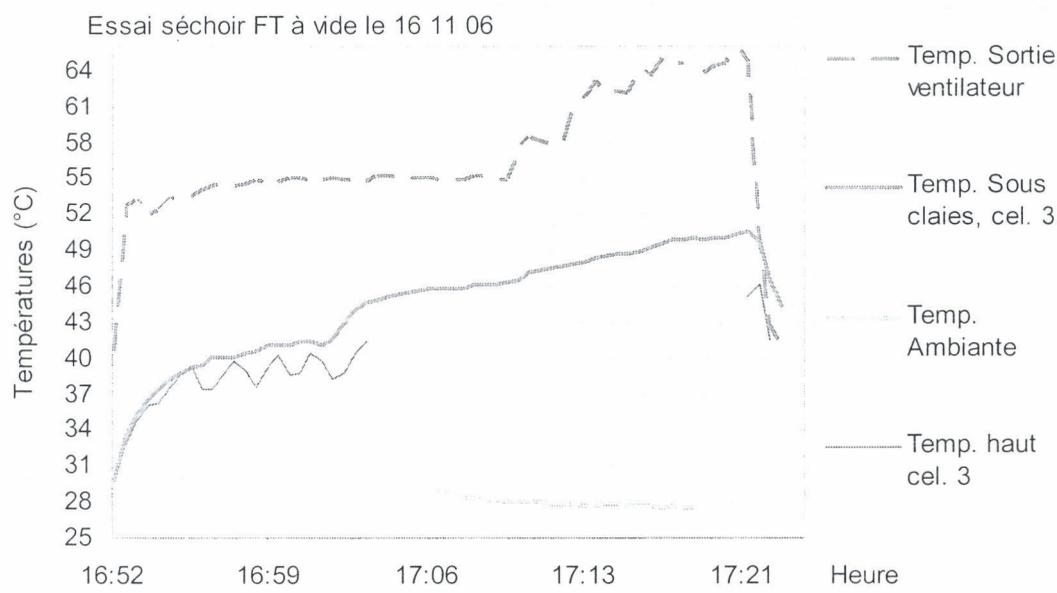
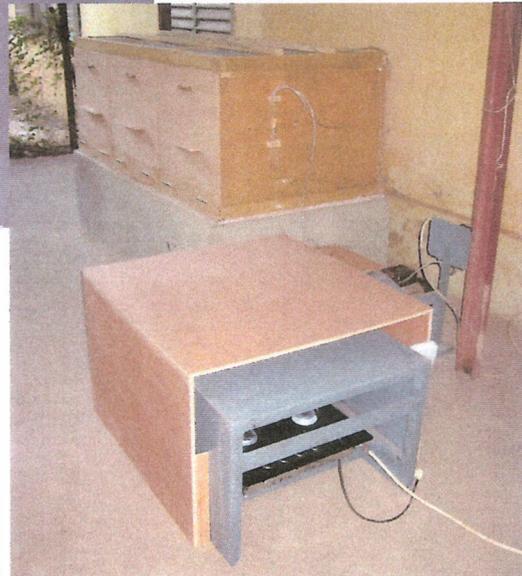


Fig. 4 : Relevé de températures lors de l'essai à vide du 16 11 00

Cet essai montre un écart de température important (plus de 10 °C) entre l'air chaud sortant du ventilateur et l'air chaud attaquant les claies au bas de la cellule 3.



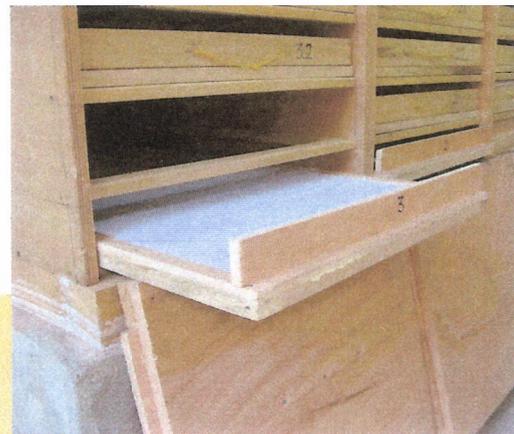
Vue générale du séchoir



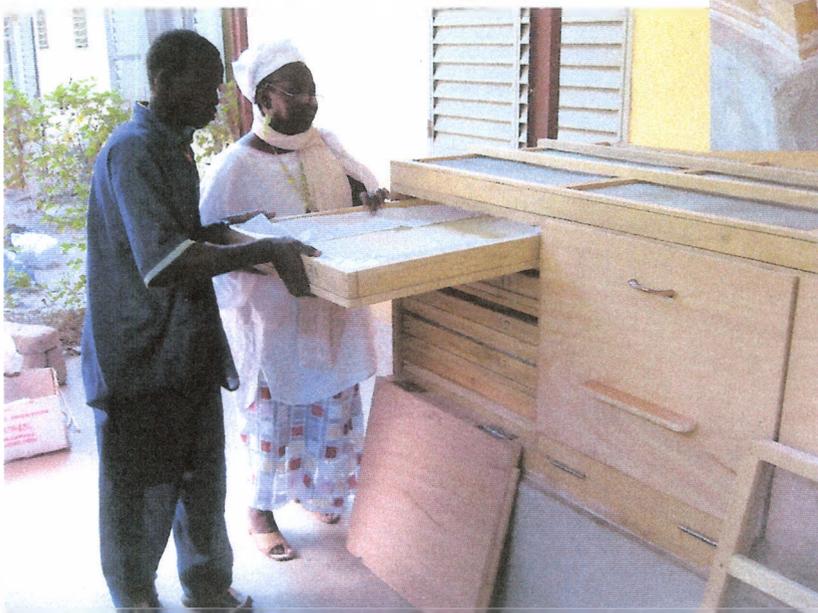
Vue du caisson  
de chauffage

**Séchoir à flux  
traversant Cirad**

Détail du filtre  
Sous claies



Permutation des claies



### III. Expérimentation du séchoir flux traversant

#### 1. Essai du 17 11 06

##### 1.1. Séchage du produit

L'essai de séchage a duré 6 heures et 18 claies, soit 3 fois 6 claies par cellule. Chaque claie est chargée de 6 kg de fonio humide soit 108 kg de fonio humide. Le produit est trop séché avec une humidité finale moyenne de 6,5 % pour une humidité initiale de 35 % base humide. La durée de séchage d'une claie en régime établi est de 2 h 30 à 3 heures environ. Les claies 4 ont une durée de séchage plus importante car elles sont introduites en même temps que les autres claies (1, 2, 3) et il n'y a pas de séchage au début de leur séjour dans le séchoir.

##### 1.2. Relevé de températures de l'air (voir fig. 5 page suivante)

L'essai a été lancé avec le séchoir vide puis les premières claies ont été introduites à 11 h 38. L'enregistrement des données a été interrompu entre 14 h 30 et 16 h suite à une coupure de courant. Les courbes de montée en températures de l'air sont caractéristiques de ce type de séchoir (voir fig. 5) : durant un cycle de permutation, la température de l'air entre les claies augmente régulièrement au fur et à mesure que le produit de la claie inférieure sèche.

En régime établi, l'humidité de l'air sortant du séchoir est élevée sans pour autant atteindre une totale saturation (humidité relative de 90 %) et l'air sort du séchoir à environ 26 °C soit une température de 8 °C inférieure à la température ambiante.

L'augmentation du débit d'air se traduit par une diminution de la température de l'air chaud à la sortie du ventilateur (changements à 13 h 42 et 14 h 22). L'augmentation de la puissance de chauffe (à 14 h 34) se traduit par une augmentation de la température de l'air.

On constate un écart de température important entre l'air sortant du ventilateur et l'air attaquant les claies au bas des cellules 1 et 3. Cet écart est plus faible quand le débit d'air est augmenté. Ceci a conduit à faire des mesures de température de surfaces pour comprendre les causes de cette perte.

##### 1.3. Relevé des températures de surfaces

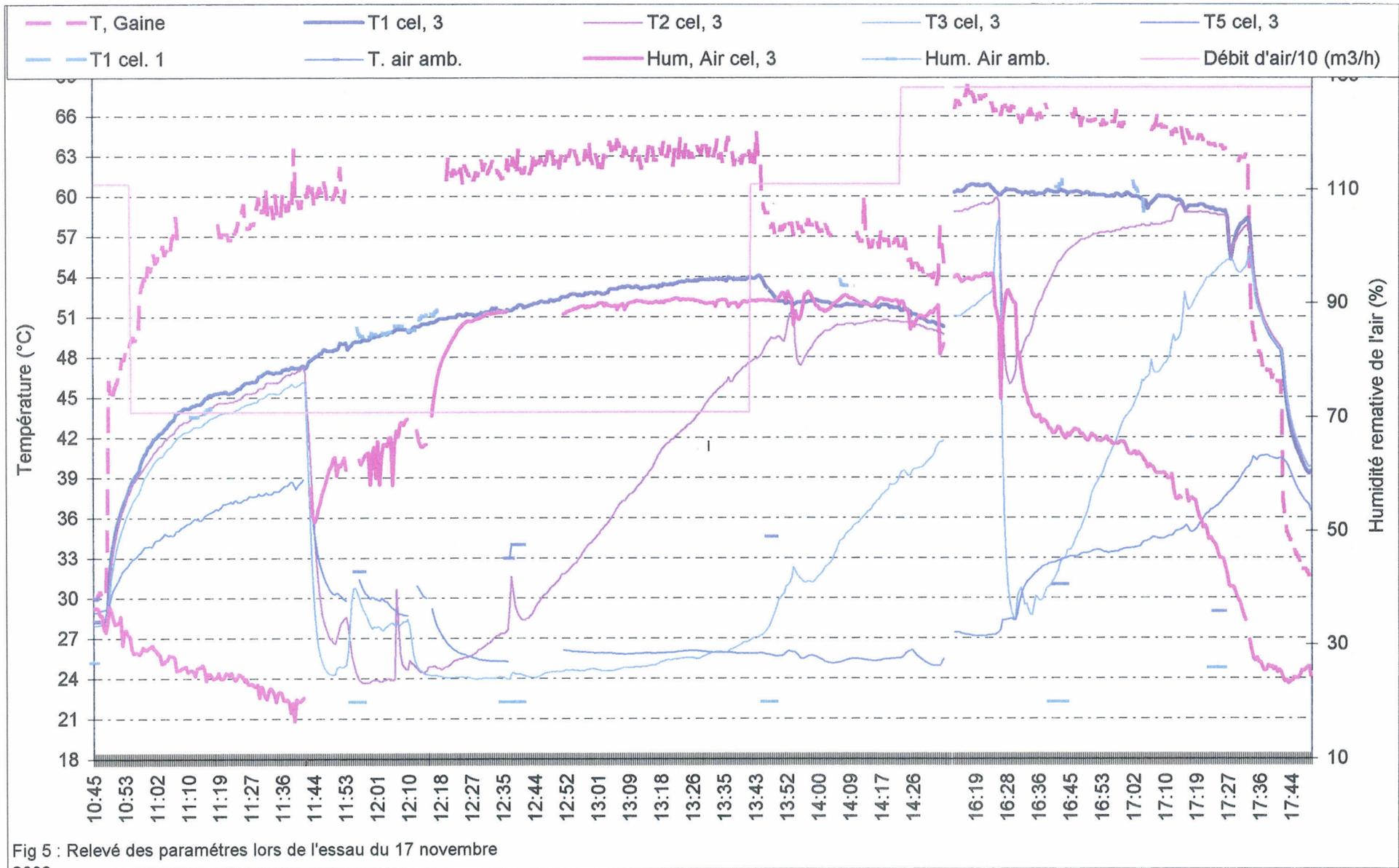
Une perte thermique importante est constatée et le relevé des températures de surfaces montre :

- Que les surfaces métalliques sont très chaudes mêmes celles qui ont été doublées intérieurement (59 °C pour une température ambiante de 34 °C),
- Que les surfaces des murs sont plus froides mais leur température augmente régulièrement au fur et à mesure de l'essai.
- Que la température des parois en bois reste faible soit un écart de température de l'ordre de 5 °C par rapport à l'air ambiant.

#### 2. Essai du 20 11 06

L'objectif poursuivi est de déterminer l'origine de la chute de température entre la sortie du ventilateur et les dessous des claies. Le relevé des températures montre que :

Graphique 1



- l'écart de température est toujours important,
- que la température de l'air à la sortie des restrictions est la même qu'à la sortie du ventilateur,
- qu'il existe une inertie importante à la montée en température de l'air sous les claies.

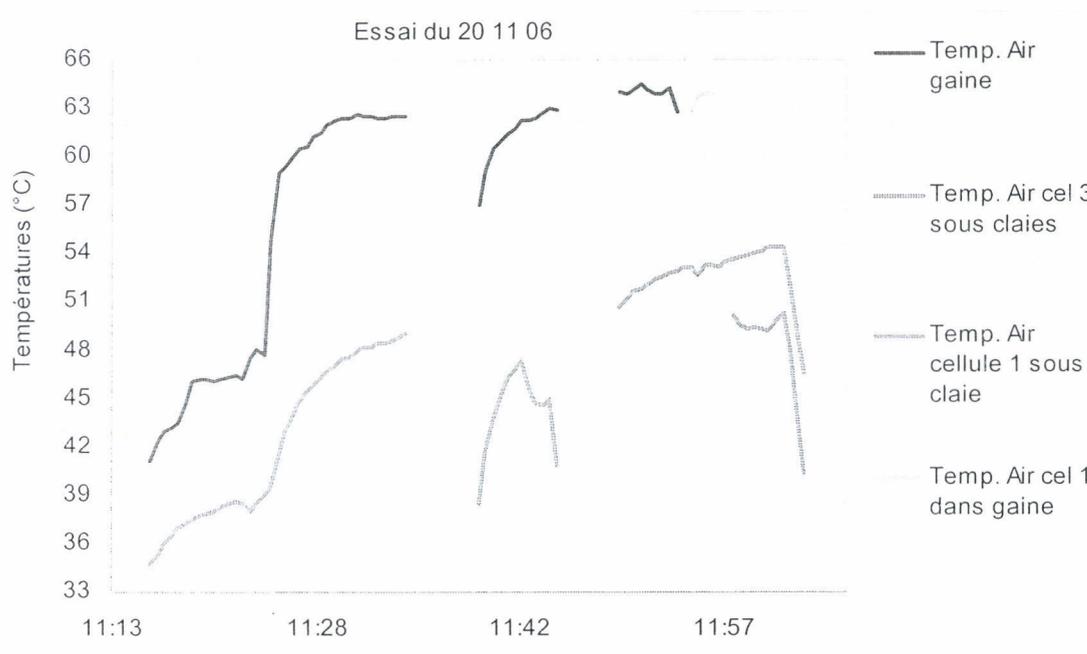


Fig. 6 : Mesure de températures lors de l'essai du 20 11 06

Cette chute de température s'explique par la chaleur nécessaire à la mise en température des murs. Les murs sont réalisés en parpaings pleins de 10 cm soit une épaisseur totale de 12 cm et une masse de l'ordre 750 kg uniquement pour les parties latérales. Ceci conduit à engager le doublage intérieur des murs, le panneau de bois ayant une inertie thermique beaucoup plus faible car sa masse est 10 fois moindre.

Par ailleurs, le doublage extérieur avec un panneau de bois, des parties métalliques du caisson de chauffage est réalisé pour éviter les pertes thermiques à ce niveau et les risques d'accidents sur les parois chaudes. L'espace entre le caisson de chauffage et le sol à cause de la mauvaise planéité du montage provoque un débit d'air aspiré à cet endroit évalué entre 145 et 300 m<sup>3</sup>/h. Cet interstice sera utilisé pour faire circuler de l'air entre le caisson métallique et la double enveloppe en bois ceci afin d'éviter qu'elle ne soit soumise à une température intérieure trop élevée provoquée par la tôle métallique.

### 3. Essai du 21 11 06

L'essai confirme l'hypothèse précédemment émise : l'isolation interne des murs par un panneau de bois permet une montée plus rapide de la température de l'air sous les claies. L'écart de température de l'air dans la gaine et sous les claies est réduit entre 3 et 5 °C au lieu de plus d'une dizaine de °C (voir fig. 7). La température dans la cellule 3 qui est isolée sur toutes les faces est plus élevée que les deux autres. On note aussi que le changement de pression de gaz se traduit par une montée rapide en température de l'air chaud (fonctionnement avec 3 feux).

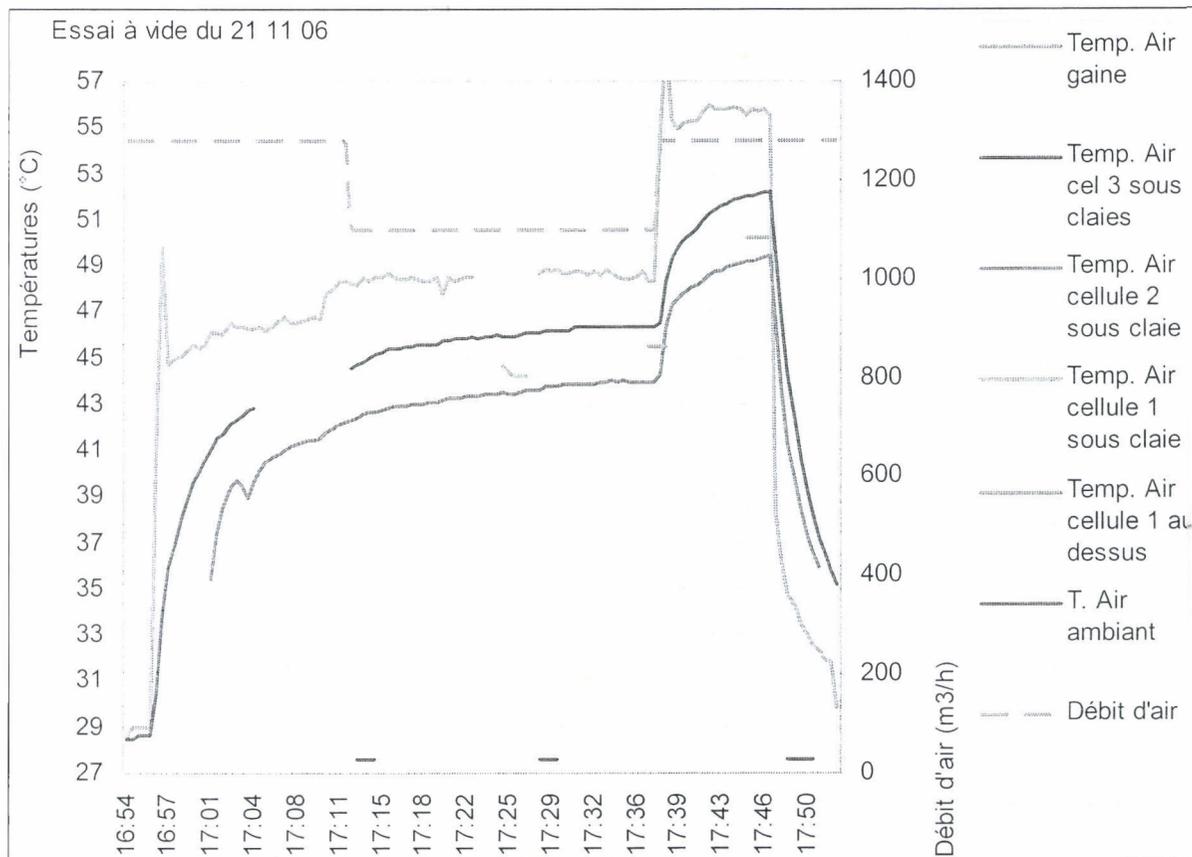


Fig. 7 : Mesure de températures lors de l'essai du 21 11 06 après doublage de la maçonnerie

#### 4. Essai du 22 11 06

87 kg de fonio réhumidifié ont été séchés soit 5 claies par cellules, le fonctionnement en continu du séchoir est très court ce qui ne permet pas d'avoir un rendement énergétique satisfaisant car l'air sortant du séchoir peu saturé lors de la phase finale. Le rendement global de 50 % ce qui est toutefois très acceptable. A 14 h 30, la puissance de 2 feux est réduite ce qui explique la chute de température de l'air chaud (voir fig. 8).

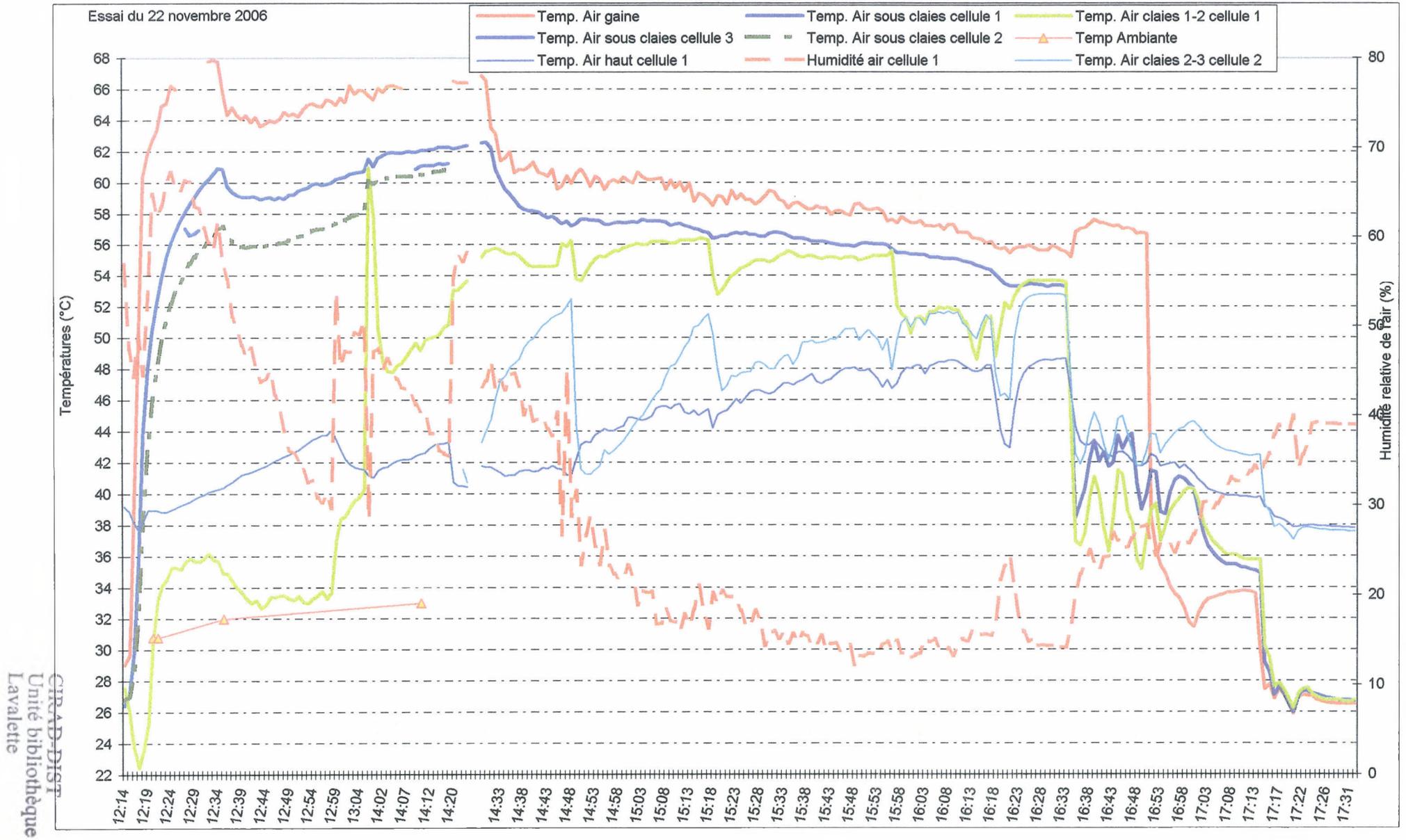
Le séchage est rapide avec en moyenne 2 heures de séchage par claie chargée de 6 kg de fonio humide. Cette vitesse de séchage s'explique par la température de l'air chaud bien supérieur à celle de l'essai du 17 11.

#### 5. Essai du 24 11 06

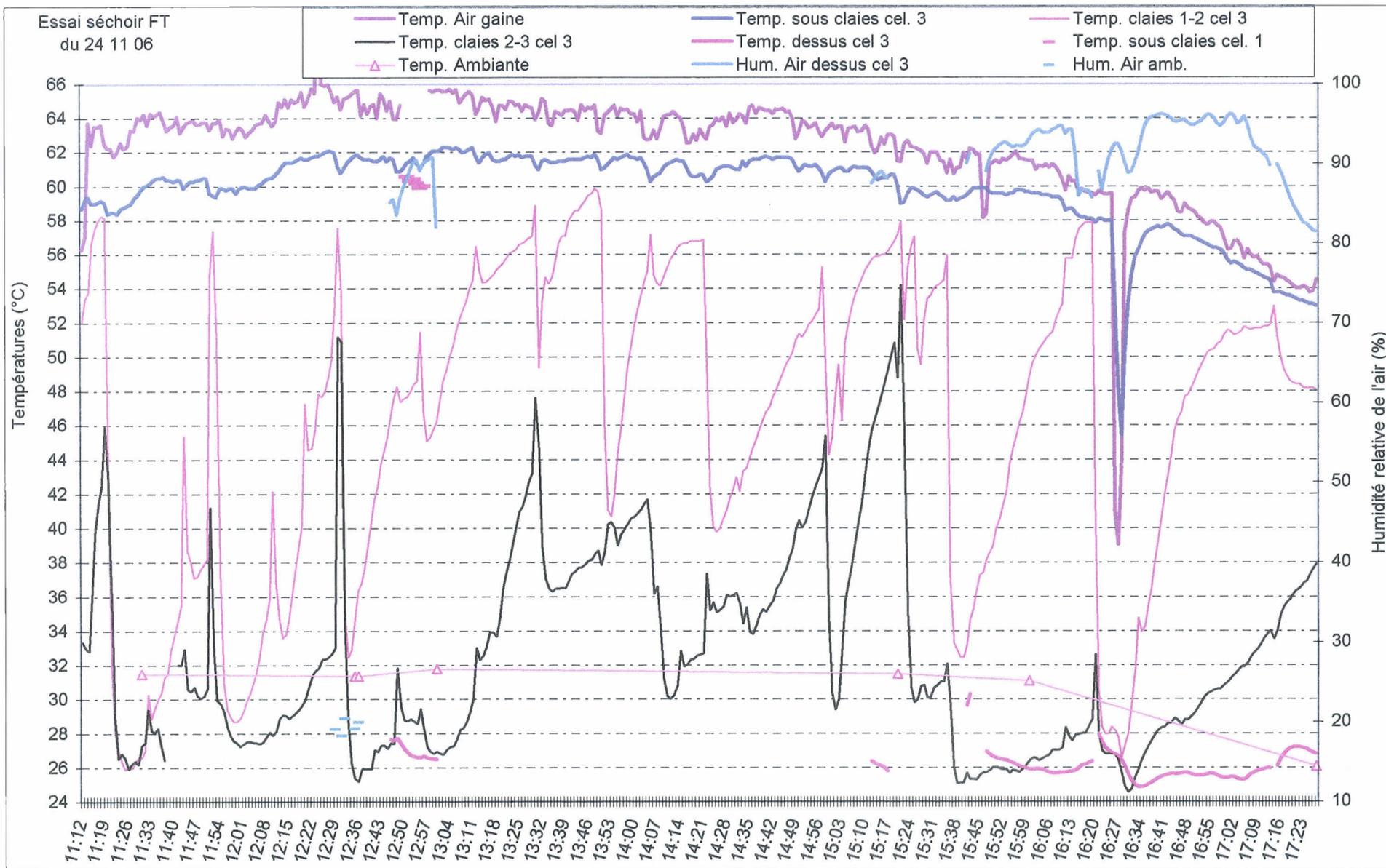
L'essai a débuté à 9 h 50 avec une charge par claie de 7 kg. Il a été réalisé avec 150 kg de fonio de Me Dème et 100 kg de fonio de Me Mariko cuit à la vapeur la veille soit 250 kg de fonio en 8 ou 9 h, soit une trentaine de kg/h.

La température de l'air dans la gaine était de 64 °C avec une chute de température en fin d'essai liée à la température ambiante et de la faible quantité de gaz restant dans la bouteille de 6 kg (voir fig. 9). La température de l'air à l'attaque sous les claies était de 2 à 3 °C inférieure à la température de l'air dans la gaine. L'évolution des températures dans les espaces inter claies est conforme à ce type de séchoir : une montée en température durant un cycle de permutation puis chute de température au moment de la permutation.

Graphique 1



Essai FT du 24 11 06 Graphique 1



Le séchage des produits est satisfaisant avec une humidité finale de 8 à 9 % pour une humidité initiale de 31,6 % b.h.. Le produit sèche en 2 heures soit une permutation des claies toutes les demies heures. L'air sort du séchoir proche de la saturation à une température voisine de 26 °C soit une température inférieure de 5 °C à la température ambiante. La position du capteur ne permet pas d'avoir une mesure exacte de l'humidité de l'air car il est influencé par la circulation d'air au dessus des cellules car le séchoir est dans un lieu ouvert.

La puissance électrique consommée par le moteur de 2,2 kW est de 1 kWe, elle pourrait être réduite avec le montage d'un moteur moins puissant (ce modèle a été choisi car il existe de fortes chutes de tension à Sotuba sur le site de l'essai) et l'utilisation d'un ventilateur industriel.

Heure	Refoulemen	Aspiration	Sous filtre	Sous claies	Totale
10:10	18	-5	16	14	23
11:30	18	-5	15	13	23
12:50	18	-5	15	13	23
16:00	16	-5	12	11	21

Tabl. 4 : Relevé des pressions (en mm CE) sur le circuit d'air en fonctionnement

Le séchoir est utilisé avec la vanne de réglage de débit complètement ouverte. La pression statique au refoulement du ventilateur est de 23 mm CE ; la perte de charge est principalement provoquée par le produit. La pertes de charge créée par le filtre est faible (2 mm CE).

Il n'a pas été possible de mesurer le débit d'air en fonctionnement (pas d'accès aux restrictions sur la gaine de distribution d'air). Par rapport au débit de fonctionnement à vide mesuré, il est réduit à une valeur de l'ordre de 1100 à 900 m<sup>3</sup>/h par la perte de charge créée par le produit et le filtre et le fonctionnement du ventilateur à température plus élevée.

## 6. Evaluation du coût de fonctionnement

A partir des données disponible fin 2006 et présentée dans la fiche de calcul de coût (voir Tabl. 5), le coût d'utilisation du séchoir flux traversant est évalué à 34 FCFA par kg de fonio sec soit 14 F d'amortissement et de réparation, 10 F de gaz, 7 F d'électricité. Le coût du séchage représente donc environ 5 % du prix de vente du fonio précuit.

## 7. Conclusion des essais du séchoir à flux traversant

Les essais très satisfaisants en terme de capacité du séchoir, de vitesse et d'humidité finale et de qualité du produit séché, d'ergonomie et de coût de fabrication. Le rendement énergétique est excellent (61 %) ce qui se traduit par une faible consommation de gaz. Par rapport aux séchoirs disponibles dans la zone (Atesta et Fac 2000), on note néanmoins un coût supplémentaire, celui de l'électricité nécessaire au fonctionnement du ventilateur mais ce coût est bien inférieur à l'économie de gaz constatée. Les essais doivent être répétés pour confirmer ces résultats et renouvelés en saison humide. La transformatrice ayant participé au séchage de son produit est très satisfaite de la qualité du séchage.

Ces essais montrent l'intérêt de la solution cellule de séchage tout en bois avec une double paroi aussi bien pour les cellules que pour le caisson de chauffage. Il conviendra de trouver un brûleur plus compact avec sécurité de présence de flamme compatible avec l'utilisation de bouteille de gaz de 6 kg. Il sera intéressant d'étudier l'utilisation d'un ventilateur de type industriel avec un moteur plus petit pour réduire la consommation d'électricité donc son coût.

Fiche évaluation du coût d'utilisation d'un équipement  
Méthode CESAM  
Maquette économique

Fiche C. Marouzé, avril 2005  
Unité monétaire : F CFA  
1 EURO = 655,96 FCFA  
Date de réalisation : 04 12 06  
Par : C. Marouzé

Type d'équipt : **Séchoir de fonio à Flux traversant Cirad**  
Type d'utilisation : **Transformatrices de fonio de Bamako**  
Base de calcul : Fonctionnement journalier

<b>Prix d'achat de l'équipement</b>	PR = Pd + Pa + Pt	<b>1 200 000 F</b>
Prix départ de l'équipement	Pd	1 100 000 F
Prix accessoires (moteur, etc.)	Pa	
Coût de mise à disposition (transport, montage, tax Pt)	Pt	100 000 F

**Caractéristiques de la machine**

Puissance moteur	P	2,2 kW
Consommation horaire électrique	Puis. Cons	1 kW
Consommation journalière de gaz		6 kg/j.
Capacité théorique	Dth	150 à 250 kg/j.
Capacité pour une journée de travail	Dréel	200 kg/j. fonio sec
Nombre de personnes nécessaires pour la condui	Nbre.m	1

<b>Nombre d'heures d'utilisation de l'équipement</b>	Nv = D.vie*D.an*Nh/j*Dis.m*Coef.ut	<b>6 221 h</b>
Nbre de jours d'utilisation de l'équipement		<b>691 jours</b>
Durée de vie de l'équipement	D.vie	6 ans
Durée de la campagne d'utilisation de la machine	D.an	160 j
Nombre d'heures d'utilisation par jour	Nh/j	9 h
Disponibilité de la machine	Disp.m	90%
Coefficient d'utilisation (clients, personnels, jours fé	Coef.ut	80%
<b>Nombre d'heures réelles d'utilisation par an</b>		<b>1037 h</b>

**Paramètres économiques**

Facteur de réparation	F.rép	0,6
Prix de l'électricité	Coût.kWh	150 F/kWh
Prix du gaz		333 F/kg
Coût journalier du conducteur de la machine	Coût.m	600 F/j
Tonnage annuel traité par la machine		<b>23 t/an</b>

**Calcul du coût d'utilisation journalier de la machine**

**6 794 F/h**

<b>Charges fixes</b>			
Amortissement	A = PR / Nv	1 736 F	26%
Réparations pièces et main d'œuvre	R = A * F.rép	1 042 F	15%
<b>Charges proportionnelles</b>			
Coût de l'électricité	Puis.cons * Coût.kWh	1 350 F	20%
Coût du gaz		2 000 F	29%
Conduite personnel	Coût.m * Nbre.m/(Disp.m)	667 F	10%
59%			

**Calcul du coût d'utilisation de l'équipement par kg de produit séché**

**34,0 F/kg**

Tabl. 5 : Evaluation du coût d'utilisation du séchoir à flux traversant

## IV. Séchoir serre

### 1. Principe et description

Le CIRAD a développé une alternative au séchage solaire direct, avec le séchoir solaire avec une convection forcée. Le séchage du produit est obtenu par rayonnement direct du soleil sur le produit et par effet de serre (température plus élevée à l'intérieur de la serre qu'à l'extérieur). L'objectif est de réaliser un séchage à basse température en utilisant comme source de chaleur, le rayonnement solaire pour l'échauffement de l'air et du produit.

Une ventilation assure une extraction continue de l'air humidifié par l'évaporation de l'eau provenant des produits. La deuxième ventilation est constituée par un brassage de l'air à l'intérieur de la serre. Elle est assurée par des ventilateurs de plafond qui favorisent le séchage en créant une vitesse relative entre l'air et le produit.

Le séchoir serre a été développé pour :

- d'une part, protéger les produits des intempéries, des oiseaux et des poussières de l'air extérieur,
- et d'autre part, réduire la manipulation du produit. En effet, il n'est pas nécessaire de le rentrer à l'arrivée des pluies ou le soir si le produit a été mis à sécher dans le courant de la journée.

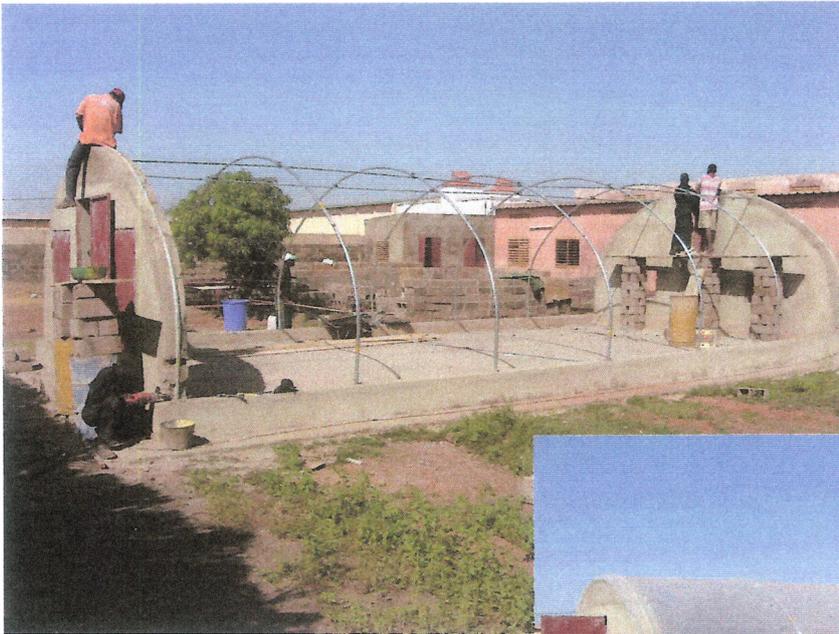
Il a été développé pour valoriser les avantages suivants :

- Extraction et brassage de l'air favorisent le séchage (par rapport aux séchoirs solaires sans ventilation dynamique).
- Séchage solaire à faible coût énergétique (quelques centaines de Watt sont nécessaires pour l'entraînement des ventilateurs), séchage à basse température et utilisation directe du rayonnement solaire.
- Séchage en une journée réduisant au minimum les risques de dégradation des produits au cours du séchage.
- Possibilités de sécher les produits sous différentes formes : farine, pâte, granules, céréales entières, mélange farine et granules.
- Possibilité de moduler la capacité du séchoir (longueur et largeur) et possibilité de mettre plusieurs unités en côte à côte pour répondre aux besoins de séchage des transformateurs.

### 2. Réalisation du séchoir serre

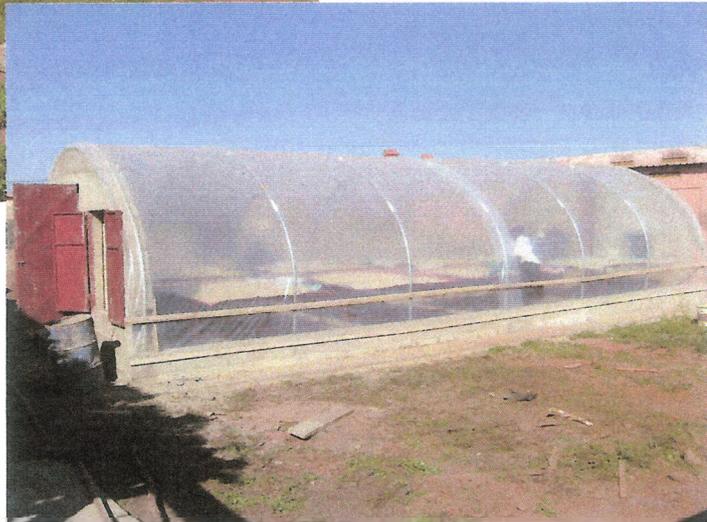
Un séchoir serre comporte une structure en tubes galvanisés supportant un film plastique de type serre avec :

- Sur le pignon arrière du séchoir, deux ventilateurs fonctionnant en continu pour renouveler l'air du séchoir, plus un ventilateur grand débit pour permettre aux opératrices de brasser le produit dans le courant de la journée.
- Sur l'autre pignon, une porte et deux entrées d'air avec une protection de type moustiquaire renforcée d'un tissu arrêtant les poussières



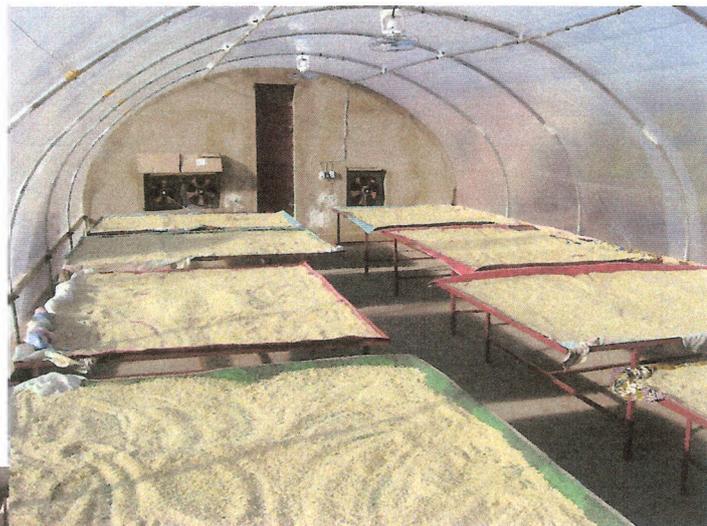
Construction du séchoir

Vie extérieure  
du séchoir

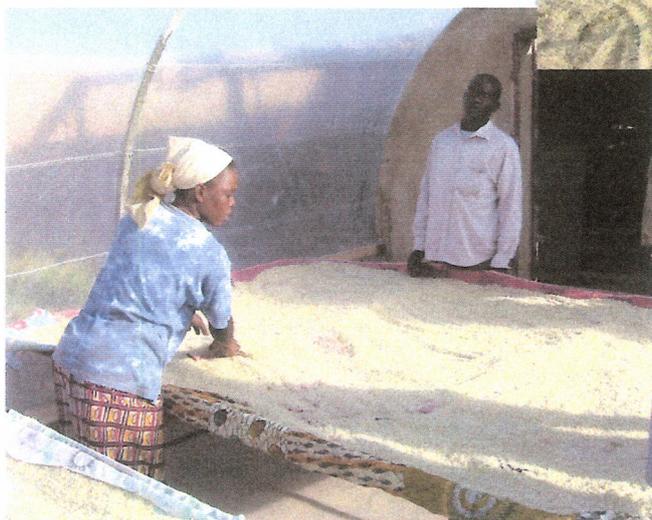


**Séchoir  
serre  
Cirad**

Vue intérieure  
du séchoir



Brassage du fonio  
sur les tables



- A l'intérieur du séchoir 3 ventilateurs de plafond qui brassent l'air.

Le produit est posé sur un tissu et étalé sur les tables grillagées qui sont chargées depuis l'allée centrale voir photos). La réalisation du séchoir a été plus longue que prévue ce qui a réduit la durée des essais durant la mission.

Le débit des ventilateurs est élevé car les pertes de charges du circuit d'air sont faibles (voir tabl. 6). La présence d'une moustiquaire même avec un filtre en tissu à l'entrée du séchoir ne crée pas une perte de charge significative. Par contre, l'essai réalisé avec une mousse-filtre crée une dépression dans toute la serre préjudiciable à la bonne tenue du film ce qui a conduit à l'abandon de cette solution.

	Sous dépression de 8 mm CE
Ventilateurs	Débit (m3/h)
V1	3000
V2	6000
V3	8000
V1 + V2	9000
V1 + V3	11000
V2 + V3	14000
V1 + V2 + V3	17000

Tabl. 6 : Débits d'extraction d'air pour les différentes configurations

### 3. Essai à vide du 23 11 06

L'essai montre que l'écart de température entre l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la serre dépend du débit d'extraction d'air (voir fig. 10). En milieu de journée, il est :

- faible quand le débit d'air est important, de l'ordre de 2 °C ce qui permet de charger le séchoir sans contraintes de température pour le personnel,
- moyen (au moins 4 °C) pour des débits de 11000 m3/h,
- plus élevé (8 à 9 °C) quand le débit d'extraction est réduit à 3000 m3/h.

Le débit important des ventilateurs et le relativement faible ensoleillement explique que l'effet de serre ne soit pas trop important.

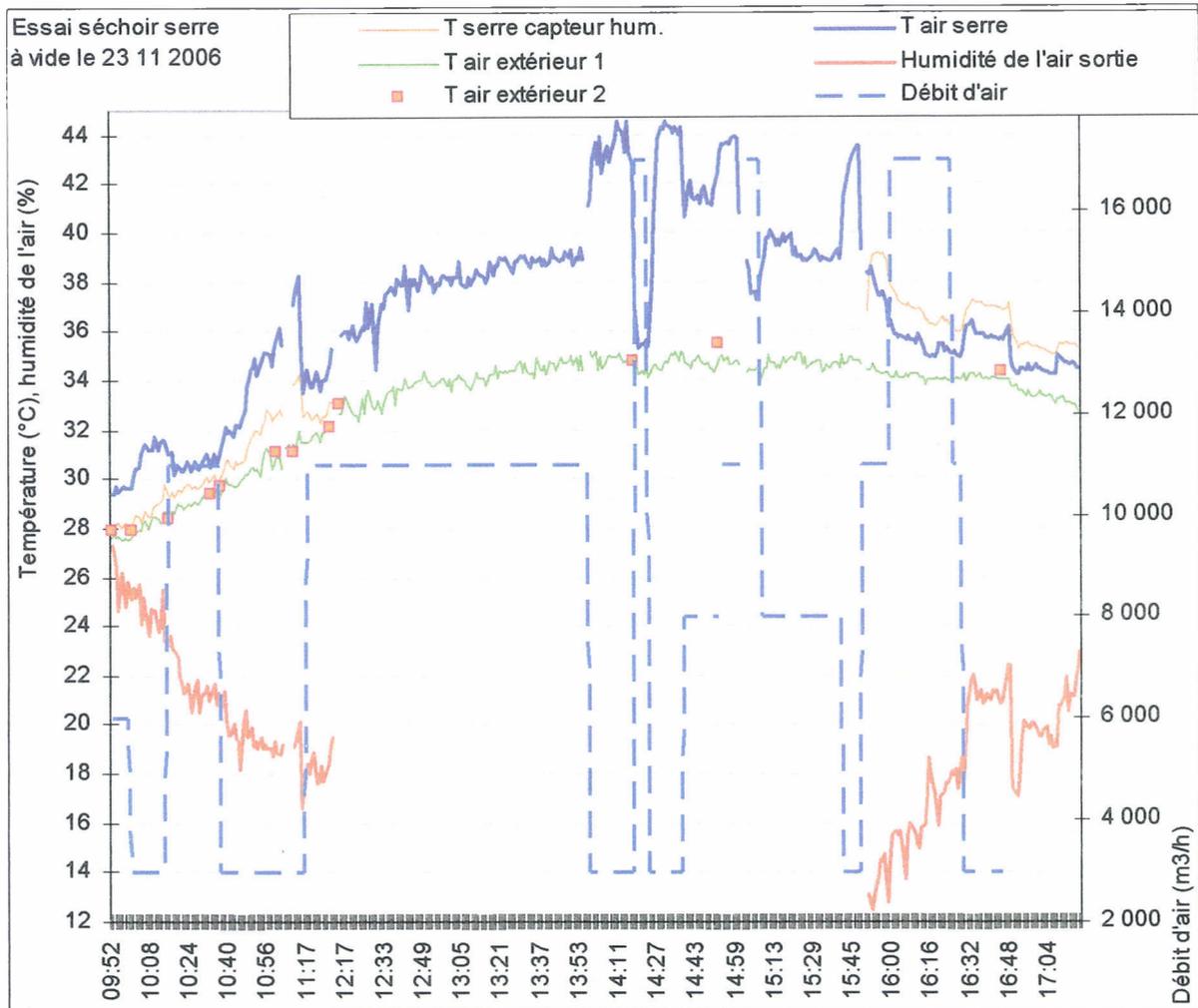


Fig. 10 : Relevé des températures, humidité et débit de l'air lors de l'essai à vide le 23 11 06

#### 4. Essai en charge les 23 et 24 11 06

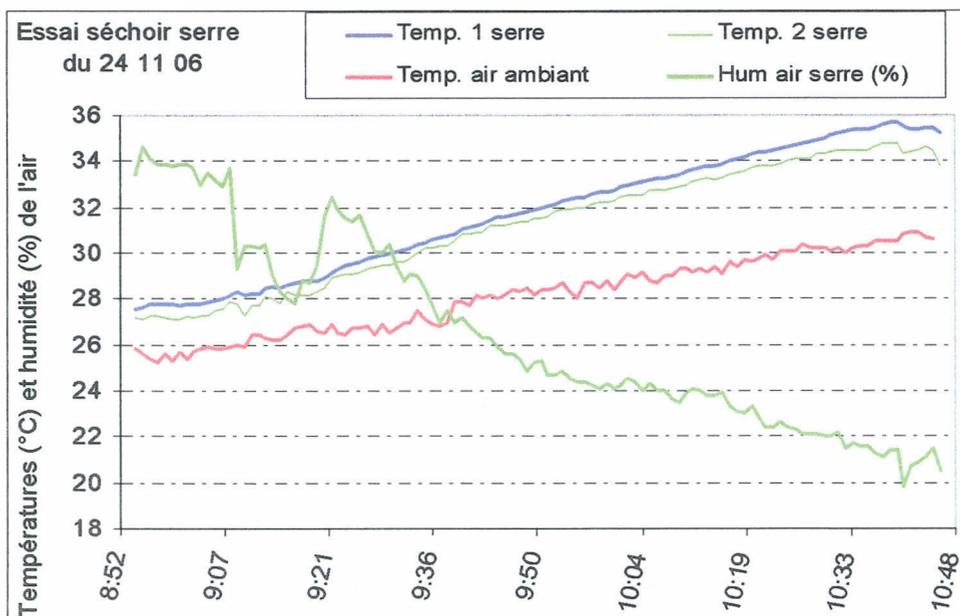


Fig. 11: Relevé des températures et humidité de l'air au début de l'essai du 24 11 06

Le relevé des températures du 24 au matin montre que pour un débit d'extraction de 6000 m<sup>3</sup>/h, l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre est de 4 à 5 °C (voir fig. 11).

	Poids fonio humide (kg)	Heure	Humidité initiale à 16 h 30	Humidité à 17 h 30	Humidité le lendemain à 10 h 50	Humidité finale à 14 h 30
Claie 1	Pas de pesée	15:40		27,6%		
Claie 2	31	15:45				
Claie 3	27,85	16:20				
Claie 4	29,3	16:00				
Claie 5	24,85	16:10				
Claie 6	24,59	16:05				
Claie 7	25,92	16:30				
Claie 8	25	16:25				6,2%
Total	219		35,2%			
Claies 1 et 2 regroupées					13,4%	8,1%
Claies 3 et 4 regroupées						6,6%
Chargement le 24 vers 9 h 30						
Claie 1 rechargement	Environ 30 kg					8,1%
Claie 3	Environ 30 kg					7,1%
Total	<b>280 kg de fonio humide</b>					
Produit ramassé le 24 à 14 h 30				Moyenne des mesures		7,2%

Tabl. 7 : Relevé des masses et des humidités du fonio

Le chargement du produit sur les claies est rapide sauf la pesée des quantités de fonio de chaque claie qui demande du temps. 25 à 30 kg de fonio précuit ont été étalés entre 15 h 40 et 16 h 30 le 23 sur les 8 claies soit 220 kg de produit.

Le 24 au matin vers 9 h 30, les produits des claies 1 et 3 ont été mis respectivement sur les claies 2 et 4 et ces claies ont été rechargées d'une trentaine de kilogrammes de fonio. La charge totale est donc de 280 kg. Les produits ont été ramassés à 14 h 30, le 24. Le séchage est donc rapide avec une humidité finale du fonio inférieure à l'objectif (7 % pour un objectif de 10 %). La capacité du séchoir est donc d'au moins 280 kg de fonio humide pour cet essai. Dans ces conditions d'ensoleillement (moyen) et d'humidité de l'air ambiant (air sec), la capacité journalière du séchoir pourrait être plus importante car l'essai n'a duré que 22 h (il manque 1 h 30 de séchage en milieu de journée) et le produit est un peu trop séché. Le produit est resté sur les claies durant la nuit.

L'idéal serait de charger le séchoir assez tôt dans l'après midi (vers 13-14 h au plus tard 15 h) de telle manière que le produit perde une bonne partie de son humidité avant la nuit (objectif: 20-25 %). Ceci permet de finir le séchage du produit durant les heures les plus favorables de la journée. Il pourra être testé :

- une charge plus importante par claies (35-40 kg),
- ou une charge de 25-30 kg/claie avec regroupement le lendemain matin de deux claies sur une seule et rechargement des 4 claies ainsi libérées.

Dans les deux cas, la capacité du séchoir en saison sèche devrait être d'au moins 300 kg de fonio humide par jour. Il faudra procéder à une autre série d'essai pour déterminer la capacité du séchoir en saison humide, elle sera inférieure à cette valeur ce qui est normal pour un séchoir solaire.

## 5. Evaluation du coût d'utilisation du séchoir serre

Fiche évaluation du coût d'utilisation d'un équipement  
Méthode CESAM  
Maquette économique

Fiche C. Marouzé, avril 2005  
Unité monétaire : F CFA  
1 EURO = 655,96 FCFA  
Date de réalisation : 04 12 06  
Par : C. Marouzé

Type d'équipt : **Séchoir serre Cirad 12 x 6,5 m**  
Type d'utilisation : **Transformatrices en zones électrifiées**  
Base de calcul : Fonctionnement journalier

<b>Prix d'achat de l'équipement</b>	PR = Pd + Pa + Pt	<b>3 500 000 F</b>
Prix départ de l'équipement	Pd	3 200 000 F
Prix accessoires (moteur, etc.)	Pa	
Coût de mise à disposition (transport, montage, t <sub>e</sub> Pt		300 000 F

### Caractéristiques de la machine

Puissance moteur		0,4 - 0,6 - 1 kW
Consommation horaire électrique	Puis. Cons	0,6 kW
Capacité théorique	Dth	200 à 300 kg/j.
Capacité pour une journée de travail	Dréel	230 kg/j. de fonio sec
Nombre de personnes nécessaires pour la condu	Nbre.m	0,4

<b>Nombre d'heures d'utilisation de l'équipement</b>	Nv = D.vie*D.an*Nh/j*Dis.m*Coef.ut	<b>11 520 h</b>
Nbre de jours d'utilisation de l'équipement		<b>1 152 jours</b>
Durée de vie de l'équipement	D.vie	10 ans
Durée de la campagne d'utilisation de la machine	D.an	160 j
Nombre d'heures d'utilisation par jour	Nh/j	10 h
Disponibilité de la machine	Disp.m	90%
Coefficient d'utilisation (clients, personnels, jours	Coef.ut	80%
<b>Nombre d'heures réelles d'utilisation par an</b>		<b>1152 h</b>

### Paramètres économiques

Facteur de réparation	F.rép	0,4
Prix de l'électricité	Coût kWh	150 F/kWh
Coût journalier du conducteur de la machine	Coût.m	600 F/j
Tonnage annuel traité par la machine		<b>26 t/an</b>

<b>Calcul du coût d'utilisation journalier de la machine</b>		<b>5 420 F/h</b>
Charges fixes		
Amortissement	A = PR / Nv	3 038 F 56% 13
Réparations pièces et main d'œuvre	R = A * F.rép	1 215 F 22% 5,3
Charges proportionnelles		
Coût de l'électricité	Puis.cons * Coût.kWh	900 F 17% 3,9
Conduite personnel	Coût.m * Nbre.m/(Disp.m)	267 F 5% 1,2
		22%

**Calcul du coût d'utilisation de l'équipement par kg de produit séché** **23,6 F/kg**

Tabl. 8 : Evaluation du coût d'utilisation du séchoir serre à Bamako

L'évaluation a été réalisée à partir des données disponibles fin 2006 et en prenant une durée de vie pour le génie civil et de la structure de 10 ans. Elle est présentée dans la fiche de calcul de coût ci-dessus (voir Tabl. 8). Le coût d'utilisation du séchoir serre est évalué à 24 FCFA par kg de fonio sec soit 18 F d'amortissement et de réparation et 4 F d'électricité. Le coût du séchage représente donc moins de 4 % du prix de vente du fonio précuit. Il est bien inférieur au coût d'utilisation des autres séchoirs par contre l'investissement est plus important.

## 6. Conclusion sur le séchoir serre

Dans les conditions favorables de l'essai du 23-24 novembre, le séchage du fonio dans la serre est satisfaisant en terme de durée de séchage, d'humidité finale du produit et de quantité de produit séché par jour. Il est nécessaire de poursuivre les essais pour optimiser les charges, les débits de ventilateurs, les périodes de brassage du produit sur les claies. Un premier guide d'utilisation est présenté en annexe.

## V. Conclusion

L'activité 3.1 du projet INCO-Fonio montre que l'utilisation d'un principe de séchage développé pour augmenter le rendement énergétique d'un séchoir à gaz permet une amélioration significative de cette variable se traduisant par une réduction de la consommation de gaz donc du coût de cette énergie. Il est trop tôt pour faire une comparaison complète entre les séchoirs à gaz tant que les essais ne sont pas réalisés dans les mêmes conditions (saisons humide ou saison sèche). En dehors de l'avantage de moindre consommation de gaz, le séchoir à flux traversant a une capacité plus importante ce qui se traduit par une réduction du coût d'utilisation.

Par rapport au séchoir FT, le séchoir serre a des coûts énergétiques bien moindres mais un prix d'achat plus élevé. Il faut aussi attendre les résultats des essais dans les différentes conditions pour comparer avec les autres séchoirs. L'avantage du séchoir serre est la possibilité d'une fabrication locale avec des techniques disponibles ou maîtrisées localement.

## Délivrables de l'activité

- Cahier des charges fonctionnel du séchoir à flux traversant pour produit granulés
- Plans du séchoir à flux traversant CIRAD
- Plans du séchoir serre CIRAD
- Guide d'utilisation du séchoir à flux traversant CIRAD
- Guide d'utilisation du séchoir serre CIRAD

## Références

- Baka N'Guessan, A. (1999). Elaboration et expérimentation d'un séchoir à gaz pour produits roulés: Cas des granules de maïs pour la fabrication d'une bouillie béninoise "Aklui". Mémoire de fin d'études d'ingénieur ENSIA SIARC, 34 Montpellier.
- Dramé, D., A. Wereme, S. Sakho, et al. (2005). Rapport de synthèse séchage fonio. in Projet CFC/IGG-(FIGG/02) "Amélioration des technologies post-récolte du fonio" 1999-2004. Editeurs CFC - CIRAD JF. Cruz & D. Dramé - Coordonnateurs.
- Gomez Eslava, C. (2005). Séchage de produits alimentaires dans les pays en développement. Validation de principes de séchoirs. Stage d'ingénieur INSA Département de génie biochimique CIRAD-AMIS Doc. Amis n° 14/2005. Montpellier. France.

- Marouzé, C., Z. Touaoro and O. Gibert (2001). Projet Fonio CFC/ICG - (FIGG/02)  
Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio CIRAD-IER-IRAG-IRSAT.  
Activité n° 13, Amélioration et conception d'équipement. Etude de principes de  
séchage de fonio. CIRAD-AMIS n° 81/01; Novembre 2001. Montpellier.
- Méot, J. M. and C. Marouzé (2005). Séchoir Cirad à produits granulés. Installation et mise en  
production au Burkina Faso et formation des utilisateurs. Compte rendu de mission de  
J.M. Méot et C. Marouzé, Travail réalisé en collaboration avec Michel Rivier (Cirad,  
Ouagadougou), Moctar Ouedraogo (Technicien ATC/B) et Hamidou Namata (EIER)  
Doc. Cirad/Amis N°17/2005 Juin 2005.
- Ursule, N. (2001). Séchoir artisanal à gaz pour les produits roulés: Tests de solutions  
techniques et évaluation des performances Mémoire de fin d'études BTS IAA de  
l'ITSA La Raque, 11 Castelnaudary; 44 p.: 44.

## Annexes

*Annexe 1 : Cahier des charges Fonctionnel du Séchoir à Flux Traversant pour Produits Granulés*

*Annexe 2 : Guide d'utilisation du séchoir à flux traversant CIRAD C. Marouzé, janvier 2007*

*Annexe 3 : Fiche d'essai du séchoir FT Cirad Fiche, modèle janv. 2007*

*Annexe 4 : Guide de fabrication du séchoir à flux traversant CIRAD, Modèle 3 cellules, C. Marouzé, janvier 2007*

*Annexe 5 : Fiche d'essai du séchoir serre Cirad*

*Annexe 6 : Guide d'utilisation du séchoir serre CIRAD, C. Marouzé, version provisoire, Janvier 2007*

## Cahier des Charges Fonctionnel

# Séchoir à Flux Traversant pour Produits Granulés

Projet : Séchoir Flux Traversant pour produits granulés

Responsable du projet : C. Marouzé

Date du projet : 06/02/2006

Description du projet :

Etude : Développer un séchoir utilisant principalement l'énergie du gaz pour l'évaporation de l'eau de produits granulés

Objet de l'étude : Séchoir Flux Traversant CIRAD

Animateur : C. Marouzé

Date de création de l'étude : 06/02/2006

Objectif de l'étude :

Mettre à la disposition des transformateurs et des équipementiers un modèle de séchoir efficace et bon marché

Réalisation d'un séchoir à flux traversant pour des produits granulés de 3 cellules avec possibilité de réduire le nombre de cellules en fonctionnement à 2

Possibilité d'utiliser d'autres combustibles que le gaz pour le chauffage de l'air (biomasse)

## 1 Contexte

### 1.1 Enoncé du besoin

#### 1.1.1 A QUI servira ce produit?

Aux transformateurs ayant des produits sous forme granulée à sécher

#### 1.1.2 SUR QUOI agira ce produit ?

Sur les produits alimentaires à sécher

#### 1.1.3 A QUOI servira ce produit ?

##### 1.1.3.1 A sécher les produits alimentaires

##### 1.1.3.1.1 Contrôle de validité des buts de l'étude

##### 1.1.3.1.1.1 Pourquoi ce but existe t'il

Beaucoup de produits alimentaires sont transformés par voie humide, il faut donc les sécher pour assurer leur conservation

##### 1.1.3.1.1.2 Conditions d'évolution

##### 1.1.3.1.1.3 Conditions de disparition

Développement un séchoir plus économique ou plus pratique

### 1.2 Présentation générale

#### 1.2.1 Quelle est l'origine de ce projet : - qui en est l'initiateur (appel d'offre,...) - Où et quand s'est posé le problème à résoudre ?

Demande des transformateurs d'un séchoir ayant des coûts de fonctionnement plus faibles que celui des séchoirs à gaz existants pour leur permettre de mettre sur le marché des produits alimentaires bon marché accessibles aux populations

#### 1.2.2 Ce projet s'inscrit-il dans un programme plus vaste ?

Projet d'appui aux transformateurs d'Afrique de l'Ouest

#### 1.2.3 Quelles suites sont prévues pour ce projet dans le temps ? Dans sa nature ?

Réalisation d'un dossier de fabrication-montage pour assurer la diffusion de ce type de séchoir

#### 1.2.4 Cette étude a-t-elle un caractère confidentiel ?

NON

#### 1.2.5 Noms et fonctions des personnes concernées par le déroulement de ce projet et ses résultats :

Toute personne travaillant en R&D dans le domaine, transformateurs, équipementiers

1.2.6 Quelle prestation attend-on en réponse à ce cdcf? pour quelles dates?

Une définition des spécifications du séchoir  
Un outil de dialogue avec les transformateurs

1.3 Diagnostic du marché

1.3.1 Quelles sont les insatisfactions habituellement relevées sur des produits voisins ?

Pour les séchoir artificiels fonctionnant à gaz, des coûts de combustible élevés  
Pour les séchoirs solaires, une mauvaise maîtrise du séchage liée à un défaut de ventilation ou ensoleillement

1.3.2 Quels sont les produits concurrents à examiner, sur quels points particuliers ?

Séchoirs Atesta, FAC 2000, ou autres séchoirs

1.3.3 Quelle est l'espérance de vie commerciale de ce produit ?

6 ans au moins

1.3.4 Quelles sont les ventes prévues par an, sur combien d'années ?

En Afrique de l'Ouest, plusieurs dizaines d'unités par an

1.3.5 Quel sera le circuit de distribution ?

Commercialisation directe par les fabricants locaux

1.4 Documentations et Informations

1.4.1 Dispose t'on d'études réalisées sur ce projet ou sur des projets voisins

OUI

1.4.2 Documents à consulter et informations à recueillir

1.5 Directives particulières sur le produit

1.5.1 A-t-on des exigences de conception pour un coût objectif (CCO) ?

OUI, avoir un prix de vente bas pour que l'achat par les transformateurs soit possible.

1.5.2 Quel genre de documentation attend-on ? quelle langue ?

Un guide d'utilisation pour les transformateurs  
Un guide de fabrication pour les équipementiers

1.5.3 Quel type de production est prévu ?

Unitaire

1.5.4 Quel est le montant des investissements prévisible, sur quelle période?

Le plus réduit possible car pas de financement spécifique pour lancer le développement de ce type de séchoir.

1.5.5 Un principe de solution est-il interdit ou imposé ?

Principe imposé : Le principe du séchoir à flux traversant du CIRAD

1.5.6 Quelle est la durée de vie attendue pour le produit ? Son niveau de fiabilité ?

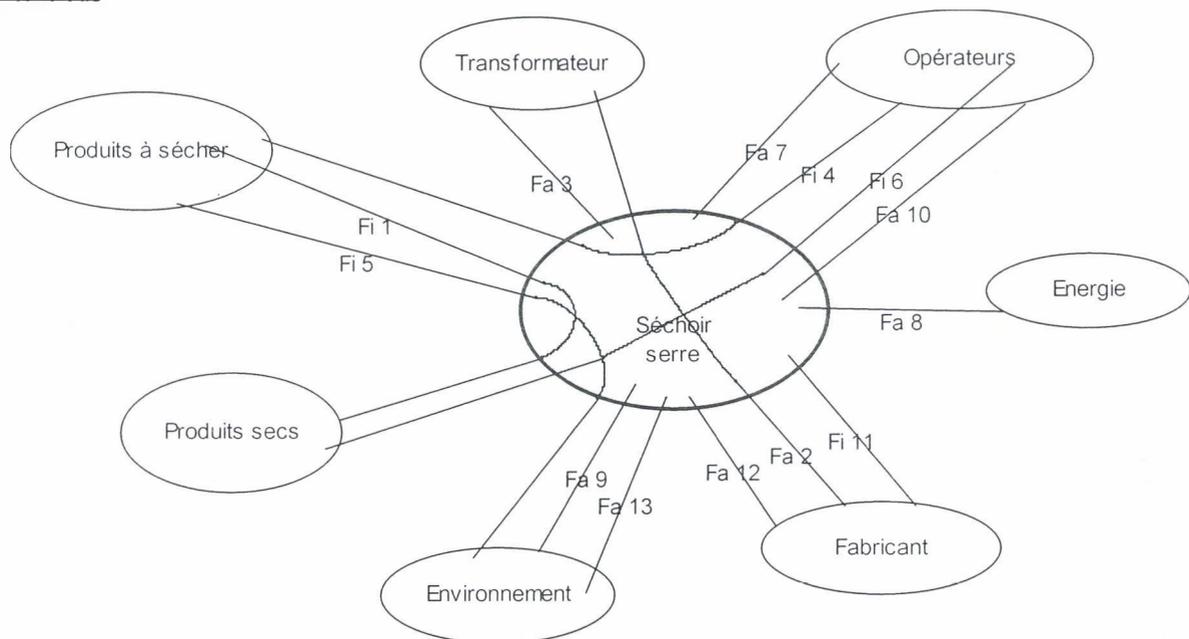
6 ans

2 Contraintes générales

Critère	Niveau	Flex	Contrôle
Maîtrise la réalisation du séchoir	Très bonne	F0	Visuel
Possibilité de réduire la capacité de séchage : passage de 3 cellules à 2 cellules	OUI	F1	Manuel

3 Analyse Fonctionnelle

3.1.1 Pieuvre



3.2 Caractérisation des fonctions

Fonction	Critère	Niveau	Flex
(Fi 1) transformer les produits à sécher en produits secs	Capacité de séchage pour des produits de type couscous	150 à 250 kg de produits secs 8 h	F2
	Taux d'humidité du produit sec	< 10 %	F0
	Durée du séchage	4 h maxi	F2
	Qualité du produit sec	Pas d'ajout d'impuretés	F0
	Température maxi du produit alimentaire sec	65 °C	F0
(Fa 2) être acheté par le transformateur au fabricant	Prix d'achat	1 200 000 FCFA	F1
	Délai de livraison	2 mois	F2

Fonction	Critère	Niveau	Flex
(Fa 3) être rentable pour le transformateur	Coût d'utilisation (amortissement et fonctionnement)	< 50 FCA/kg de produit sec	F1
(Fi 4) permettre aux opérateurs de disposer les produits à sécher	Main d'oeuvre nécessaire	1 opératrice pour les opérations de chargement, permutation et déclayage	F1
(Fi 5) évacuer dans l'environnement l'eau des produits à sécher	Absence de nuisances	OUI	
(Fi 6) permettre aux opérateurs de reprendre le produit sec	Main d'oeuvre nécessaire	1 opératrice pour les opérations de chargement, permutation et déclayage	F2
(Fa 7) permettre aux opérateurs de contrôler le séchage	Possibilité de prélèvement de produit	2 fois au cours du séchage	F1
(Fa 8) Utiliser les énergies disponibles	Electricité réseau	220 V	F0
		0.7 kW en fonctionnement continu	F1
	Gaz	Bouteille de 12 kg	F0
		< 0,7 kg/h	F1
(Fa 9) s'insérer dans l'environnement	Surface au sol	3 X 2 m	F1
	Evacuation de l'air humide en partie supérieure		F0
(Fa 10) permettre aux opérateurs d'assurer le nettoyage du séchoir	Durée du nettoyage	1/4 heure à 1 femme	F2
(Fi 11) être fabricable localement par le fabricant	Maîtrise par le fabricant de la réalisation et du montage du séchoir	Bonne	
	Délaï d'approvisionnement	2 mois	
	Tous les composants doivent être disponible localement	Sauf mesure température et sécurité	
(Fa 12) être réparable par le fabricant	Disponibilité du fabricant pour intervention	2 jours maxi	
(Fa 13) Résister à l'environnement et à l'usage	Durée de vie du séchoir	6 ans	F1

# Guide d'utilisation du séchoir à flux traversant CIRAD

C. Marouzé, janvier 2007

## Principe de fonctionnement du séchoir à flux traversant

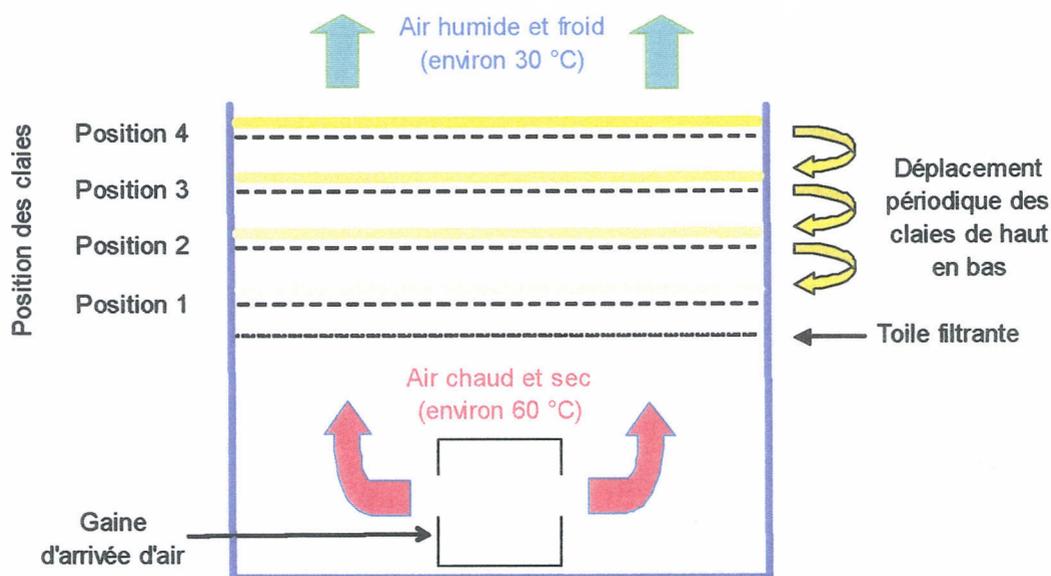


Fig. 1 : Schéma de principe du séchoir à flux traversant

Le principe du séchoir à flux traversant est de créer un mouvement à contre courant entre le flux d'air chaud qui va de bas en haut et le produit qui descend par étapes depuis la position 4 jusqu'à la position 1. Ce mouvement à contre courant (air/produit) permet d'utiliser toute la capacité évaporatoire de l'air donc de réduire au minimum la consommation de gaz. En fonctionnement continu, le produit humide est étalé sur une claie qui est placée en position supérieure (4) dans le séchoir. Le produit sec est retiré de la position 1.

Il est nécessaire de contrôler l'humidité du produit sur la claie en position 1. Quand cette humidité est bonne (10 % b.h.), la claie en position 1 est retirée et chacune des 3 autres claies est descendue d'un niveau.

## Réglages préalables

### Réglage du débit d'air réalisé avec la vanne papillon placée avant le ventilateur

Avant la première utilisation du séchoir, il faut étalonner le réglage du débit d'air. Pour chaque type de produit séché par l'entreprise, il faut rechercher le débit maximum d'air pouvant traverser le séchoir. Plus le débit est important, plus la capacité du séchoir sera importante, il est donc intéressant de travailler avec le débit maximum. Par contre, un débit trop important va provoquer une flottation locale du produit en fin de séchage. Ceci va créer un passage préférentiel de l'air chaud donc une hétérogénéité dans le séchage, voire l'impossibilité de sécher certaines zones des claies.

Pour un produit donné, il faut :

- charger une claie de produit sec l'étaler en couche le plus régulièrement possible ;
- puis, poser la claie en position supérieure et fermer la porte ;
- fermer la vanne de réglage de débit d'air ;

- mettre en route le ventilateur (il n'est pas nécessaire de chauffer l'air) ;
- la vanne de réglage de débit d'air doit être progressivement ouverte tout en surveillant le produit sur la claie ;
- pour une certaine ouverture de la vanne, il va se produire un bouillonnement des granules à un endroit de la claie. Pour cette ouverture, le débit d'air est trop important ;
- il faut refermer légèrement la vanne pour réduire le débit de telle manière que le bouillonnement des grains s'arrête ;
- Cette position est la position de référence pour le produit considéré.

Il faut ensuite faire la même manœuvre pour les autres produits séchés par l'atelier.

**Pour le modèle introduit en 2006 à Bamako, le séchage se réalise avec la vanne complètement ouverte.**

Réglage de la température d'attaque du produit.

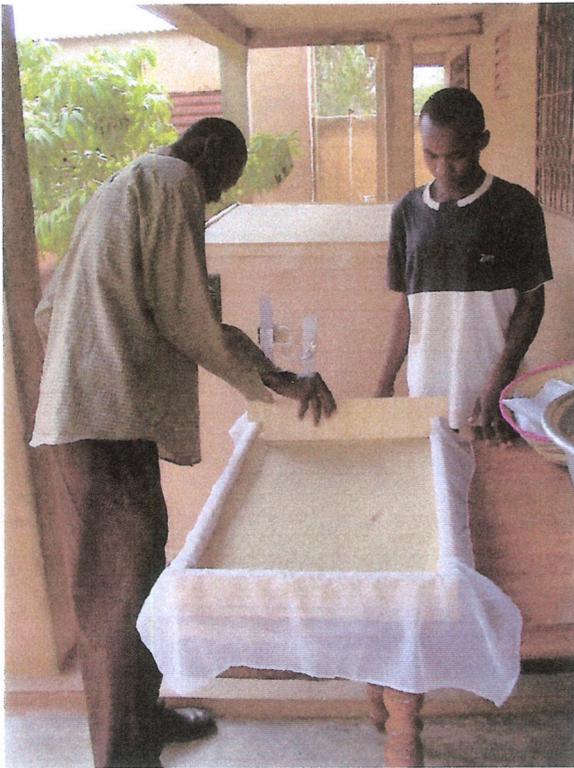
La température de l'air chaud à l'attaque du produit est indiquée par le thermomètre placé sur la gaine après le ventilateur. Le réglage est effectué après mise en route du ventilateur et réglage du débit d'air. Pour régler la température, on peut agir sur la pression du gaz et/ou sur le réglage des boutons du brûleur. Plus la pression du gaz est élevée plus la puissance de chauffe est importante et la température de l'air élevée. Il faut normalement sécher à une température d'air de 60 C°. Il est possible de sécher à une température plus faible mais ceci réduit la quantité de produits séchés par jour.

***Pour la mise en route, il faut suivre l'ordre des opérations suivantes :***

- Avant de démarrer le séchoir, il faut s'assurer qu'une quantité suffisante de produit humide est prête à sécher (au moins 40 kg).
- Régler la position de la vanne de réglage de débit d'air en position ouverte (0).
- Charger deux claies par cellule et les placer en position 1 (position la plus basse) et 2, environ 7 - 8 kg de produit humide par claie.
- Mettre en route le ventilateur.
- Mettre en route le brûleur (détendeur et bouton de réglage en position à définir) puis au bout de quelques minutes vérifier la température de l'air chaud dans la gaine et ajuster la position du détendeur ou la position des boutons de réglage. Le niveau de température recommandé est de 60 °C. Plus la température de l'air est élevée, plus le séchage est rapide et la capacité du séchoir importante.
- poursuivre le chargement des claies en position 3 et attendre une heure pour charger les claies en position 4.
- surveiller le séchage de la claie en position 1.

***Chargement des claies***

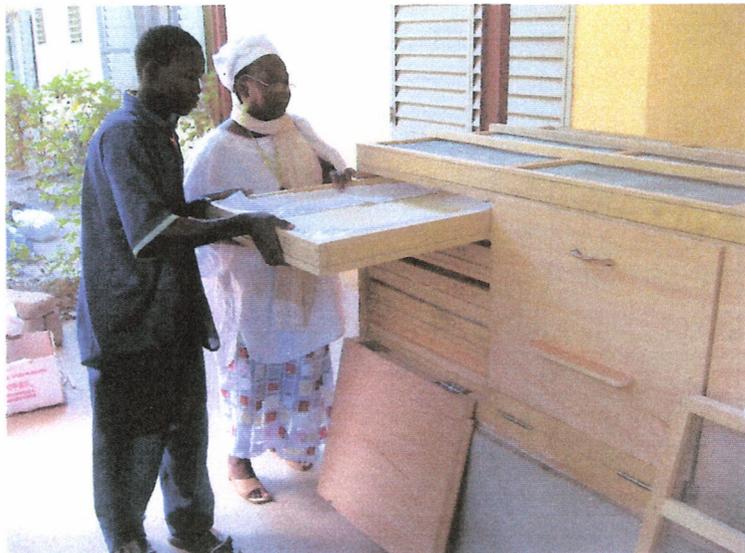
- Le tissu doit être plus grand que la claie (au moins 25 cm de plus sur les deux longueur, soit 115 x 80 cm) de telle manière que l'on puisse recouvrir partiellement le produit après sa mise en claie.
- Il est souhaitable de mettre toujours à peu près la même quantité de produit sur chaque claie. Cette quantité peut être dosée à l'aide d'une bassine ce qui est plus simple qu'une pesée.
- Le tissu doit être tendu sous le produit. Il faut bine remplir les bords de calies et le angles pour éviter les passages préférentiels d'air.
- Le produit doit être réparti le plus régulièrement possible sur les claies, il est souhaitable d'utiliser une règle pour égaliser le niveau de produit.



Photos 1 et 2 : Chargement des claies ;  
 égalisation du niveau de fonio et repliage du  
 tissus au dessus du produit

### **Permutation des claies**

Photo 3 : Sortie de la claie en  
 position 1



Il convient d'enchaîner les opérations suivantes :

- surveiller l'humidité du produit de la claie en position 1 (la plus basse),
- quand le produit de la claie en position 1 est sec, il faut retirer la claie, puis,
- retirer la claie en position 2 et mettre la claie en position 1,
- retirer la claie en position 3, brasser le produit et remettre la claie en position 2,
- procéder de même avec la claie 4 mais sans brasser le produit, fermer la porte,
- recharger la claie libre et la mettre en position 4.

**Nota :** la porte ne doit être ouverte qu'un minimum de temps pour éviter que l'air chaud ne soit rejeté à l'extérieur sans traverser le produit. Par exemple, durant le brassage du produit de la claie passant de la position 3 à la position 2, il faut poser la claie sur une table et refermer la porte durant le brassage du produit.

## Quelques indications sur la conduite du séchage

### Pour le fonio :

Charge recommandée des claies en produit humide : 7-8 kg

La trappe de réglage de débit d'air est sur 0

La durée de séchage est de l'ordre de 2 heure soit une permutation toute les 30 min.

Pour réduire les manipulations de claies et limiter le temps d'ouverture des portes, il serait intéressant de tester un mode de permutation avec 3 claies maximum par cellule :

- charger les claies avec un peu plus de produit (8-9 kg de fonio humide)
- au début ne charger que 3 claies par cellule,
- quand la claie en position 1 est sèche, l'enlever et mettre la claie libre préalablement chargée en position 4 sans toucher aux 2 autres claies (en position 2 et 3),
- quand la claie en position 2 est sèche, l'enlever et descendre de 2 niveaux les claies en position 3 et 4 (les mettre respectivement en position 1 et 2), puis mettre une claie chargée en position 3,
- poursuivre ainsi de suite.

## Fonctionnement du brûleur

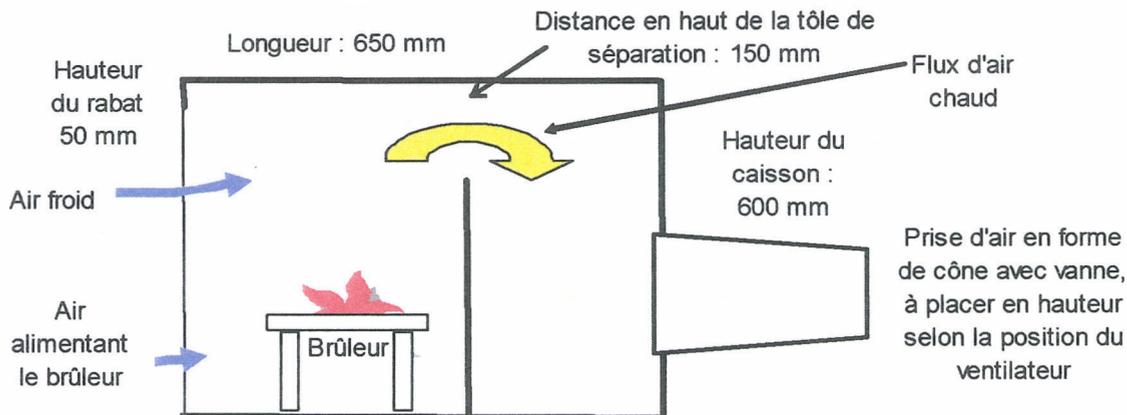


Fig. 2 : Schéma de principe du caisson du brûleur

Le rôle du caisson brûleur est de récupérer la chaleur produite par un brûleur à gaz en assurant un mélange entre les fumées de combustion et l'air ambiant. Une tôle intermédiaire évite que le flux d'air principal n'éteigne la flamme du brûleur. Une sécurité de présence de flamme est installée sur chaque brûleur.

## Arrêt du séchoir en fin de journée

Il n'est pas nécessaire de vider complètement le séchoir en fin de journée ; les deux dernières claies peuvent rester dans le séchoir durant la nuit sans que le séchage ne soit terminé car le produit a suffisamment perdu d'humidité pour attendre le lendemain sans dégradation.

Il faut d'abord arrêter le brûleur puis 3 minutes plus tard arrêter le ventilateur pour évacuer la chaleur du caisson et du ventilateur.

Fiche d'essai du séchoir FT Cirad

	Mise en route	Arrêt
Ventilateur		
Brûleur		

Fiche modèle janv. 2007

Essai du :  
Produit :

Paramètres séchoir	Heure	9:30						
Pression de gaz	mbar							
Nbre de feux utilisés								
Position de la vanne d'air :		0						
T. air chaud sorti vent.	°C							
T. air chaud sous claies cel 1								
T. air chaud sous claies cel 3								
Température de l'air ambiant :	°C							
Humidié de l'air ambiant :	%							
Masse bouteille de gaz	kg							
Pression refoult ventilateur	mm CE							

Mesures produit claies		Masse prod hum.	Entrée séchoir	Masse prod sec	Sortie séchoir	Perte en eau	Durée de séchage	Humidité produit
		kg	hh:mm	kg	hh:mm	kg	hh:mm	%
Celule 1	Claie 1							
Celule 2	Claie 1							
Celule 3	Claie 1							
Celule 4	Claie 1							
Celule 1	Claie 2							
Celule 2	Claie 2							
Celule 3	Claie 2							
Celule 4	Claie 2							
Celule 1	Claie 3							
Celule 2	Claie 3							
Celule 3	Claie 3							
Celule 4	Claie 3							
Celule 1	Claie 4							
Celule 2	Claie 4							
Celule 3	Claie 4							
Celule 4	Claie 4							
Celule 1	Claie 1							
Celule 2	Claie 1							
Celule 3	Claie 1							
Celule 4	Claie 1							
Celule 1	Claie 2							
Celule 2	Claie 2							
Celule 3	Claie 2							
Celule 4	Claie 2							
Celule 1	Claie 3							
Celule 2	Claie 3							
Celule 3	Claie 3							
Celule 4	Claie 3							
Celule 1	Claie 4							
Celule 2	Claie 4							
Celule 3	Claie 4							
Celule 4	Claie 4							
Celule 1	Claie 1							
Celule 2	Claie 1							
Celule 3	Claie 1							
Celule 4	Claie 1							

# Guide de fabrication du séchoir à flux traversant CIRAD

## Modèle 3 cellules

C. Marouzé, janvier 2007

La fabrication du séchoir à flux traversant fait appel à 2 corps de métiers différents : la menuiserie et la tôlerie plus la maçonnerie si nécessaire.

### I. Maçonnerie

Le séchoir doit être implanté dans un endroit protégé de la pluie et des vents mais qui doit être ouvert pour assurer l'évacuation de l'air humide provenant du séchoir. Il faut au moins un mur jusqu'à la toiture à l'arrière, il est souhaitable d'en avoir au moins un sur le côté. Si elle n'est pas disponible, il faut réaliser une dalle de 3 m de large sur au moins 3 m pour permettre aux opérateurs de travailler dans un endroit propre.

### II. Fabrication de la partie en bois

#### 1. Cellules (plans 11 et 12)

Le travail de menuiserie commence par la réalisation des cellules ; les 3 cellules sont identiques. Elles sont constituées de deux panneaux en mélaminé de 18 mm et d'une série de 5 supports de claies. La particularité de ce séchoir est que les supports de claies supportent les claies sur leurs 4 côtés pour éviter le passage de l'air à l'avant et à l'arrière des claies. Le plan d'appui des supports doit être parfaitement plan (plan 15). Il est donc nécessaire de tracer les panneaux avant la fixation des supports. Il est souhaitable de clouer les lattes par l'extérieur des cellules.

Les cellules sont posées côte à côte sur une assise constituée d'une plateforme qui repose sur la maçonnerie. Les supports de claies inférieures permettent d'assurer la fixation des cellules sur l'assise. Les panneaux jointifs sont fixés entre eux.

#### 2. Cadre filtre (plan 16) et support moustiquaire

Le cadre filtre est un cadre rectangulaire sur lequel fixé un filtre en mousse doublé sur le dessus d'un tissu dont le rôle est d'arrêter les poussières et impuretés de telle manière que le produit ne soit pas pollué. Il est positionné au niveau le plus bas. Les 4 autres supports servent aux claies.

Le support de moustiquaire est posé à la partie supérieure avec une charnière à l'arrière. La moustiquaire évite que le produit ne soit attaqué par les mouches. Les deux longerons permettent de poser les claies vides au dessus du séchoir.

#### 3. Portes (plan 19)

Les 3 portes sont identiques. Elles sont constituées d'un panneau mélaminé doublé. Une charnière permet leur basculement horizontal. Une poignée est placée à 10 cm du haut de chaque porte. La porte est maintenue en position fermée par un aimant de chaque côté avec une partie de l'aimant fixé sur les panneaux à l'intérieur des cellules.

#### **4. Claies (plans 20, 21)**

Les claies sont un élément essentiel du séchoir dont la fabrication doit être très soignée ; les claies sont manipulées à de multiples reprises pour assurer un déplacement du produits à contre courant du flux d'air. Il y a 12 claies soit 4 par cellule. Les claies sont constituées :

- D'un cadre inférieur en bois de section 20 x 35 mm,
- D'un treillis en acier de maille 10 à 15 mm avec un fil de 10/10<sup>ème</sup>,
- D'un cadre supérieur en bois de section 60 x 20 mm.

Les trois éléments sont assemblés par des vis à bois par le dessous. Le cadre inférieur est plus large que le cadre supérieur. Le jeu entre cette partie de la claie et l'intérieur de la cellule est de 10 mm. Pour éviter la déformation du treillis 3 plats en acier de 15 x 3 mm sont placés sur chant sous le treillis. Pour avoir une bonne rigidité des claies, les éléments du cadre supérieur sont assemblés à chaque angle par deux vis (diamètre 3 ou 3,5 mm, longueur 40 mm).

Pour retirer les claies du séchoir, il est prévu une poignée en ficelle ou fil électrique à chaque extrémité passant par les 2 trous prévus dans le cadre supérieur. La longueur de la poignée doit être courte pour éviter de gêner la fermeture de la porte.

### **III. Fabrication de la partie métallique**

#### **1. Ventilateur pour moteur tournant à 2850 tr/min (plan 30)**

La roue du ventilateur est montée directement sur l'arbre moteur. Il est donc essentiel d'assurer un bon équilibrage de la roue de ventilateur sinon les roulements fatiguent vite. Pour cela, plusieurs conditions doivent être respectées :

- Assurer une bonne concentricité du moyeu (pièce 38), en particulier entre l'alésage et le diamètre extérieur de 60 mm,
- Assurer la cote de l'alésage du moyeu (Dia 19 mm, H7-g6), il ne doit être ni libre, ni trop serrant sur l'arbre,
- Réaliser des pales rigoureusement identiques (Pièce 34), pour cela il est conseillé après leur découpe de les assembler les uns sur les autres et de meuler l'ensemble pour avoir les mêmes côtes pour chaque pale du rotor.
- Essayer de faire des cordons de soudure identiques pour chaque pale.

La carcasse du ventilateur est réalisée avec deux flancs de forme extérieure identique reliés par une virole (bande de tôle de 120 mm de large). Les flancs et la virole sont soudés.

Il est important de veiller au respect du jeu de 3 mm entre la roue du ventilateur et l'intérieur de la carcasse du ventilateur. La distance entre la roue et l'entrée d'air est de 5 mm soit les 3 mm de jeu + l'épaisseur de la tôle. C'est la position du moteur sur son châssis qui détermine cette cote (c'est pour cela que les perçages de fixation du moteur sur le châssis ne sont pas cotés). Il faut aussi que la roue soit parallèle à la carcasse. Il est nécessaire de monter en l'air et correctement le moteur, la roue, la carcasse et le châssis puis de réaliser les soudures entre le châssis et la carcasse.

L'entrée d'air dans le ventilateur est constituée d'un cône et d'une bride. Cet ensemble est fixé à l'aide de 6 boulons sur le flanc du ventilateur côté ouverture de diamètre 238 mm (passage de la roue). Le diamètre d'implantation de ces 6 boulons est de 260 mm.

Cette entrée comporte une vanne papillon qui assure le réglage du débit d'air. Un axe de diamètre 10 mm est guidé par deux bagues de 20 mm de long diamétralement soudées sur la virole. Deux demi-secteurs sont ensuite soudés sur l'axe. Le positionnement de la vanne est assurée par un secteur quart de cercle relié à l'axe par une autre bague courte. L'extrémité du secteur est pincée entre une patte soudée sur la bride et une rondelle pressée par un écrou papillon.

## **2. Caisson brûleur (plan 40)**

Le rôle du caisson brûleur est de récupérer la chaleur produite par un brûleur à gaz en assurant un mélange entre les fumées de combustion et l'air ambiant. C'est un parallélépipède ouvert à l'avant, côté où l'on place le brûleur. Une tôle intermédiaire évite que le flux d'air principal n'éteigne la flamme du brûleur.

## **3. Gaine de répartition d'air chaud (plan 50)**

La gaine est un caisson rectangulaire en tôle de 15/10<sup>ème</sup>. Elle est réalisée en 2 parties identiques avec un pliage central. Il est nécessaire de réaliser une encoche correspondant à l'entrée qui est divergente. Les sorties d'air sont réalisées avec une scie cloche après soudure du caisson. Un tube de 10 mm est soudé dans la partie divergente ; il permet de mesurer la pression de l'air à la sortie du ventilateur. Une plaque de fermeture est prévue pour boucher les sorties d'air de la troisième cellule au cas où la transformatrice ne voudrait utiliser que deux cellules.

## **IV. Montage et assemblage (plan 7)**

La gaine est posée sur la plateforme et l'espace entre la gaine et le bois est siliconé pour éviter un passage d'air et une zone difficilement nettoyable. Après montage de la gaine, les espaces libres au niveau des cloisons seront bouchés par des chutes de mélaminés et du silicone.



# Guide d'utilisation du séchoir serre CIRAD

C. Marouzé, version provisoire, Janvier 2007

## Principe de fonctionnement du séchoir serre

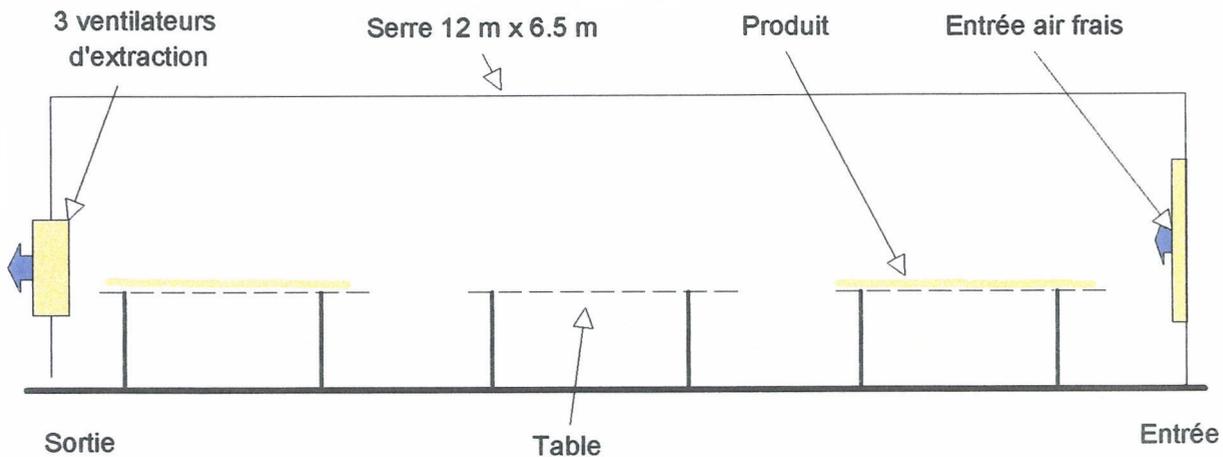


Fig. 1 : Schéma de principe du séchoir serre

Le CIRAD a développé une alternative au séchage solaire direct, avec le séchoir solaire avec une convection forcée. Le séchage du produit est obtenu par rayonnement direct du soleil sur le produit et par effet serre (température plus élevée à l'intérieur de la serre qu'à l'extérieur). L'objectif est :

- de réaliser un séchage à basse température en utilisant comme source de chaleur, le rayonnement solaire pour l'échauffement de l'air et du produit,
- De réaliser un séchage hygiénique en protégeant le produit de l'environnement extérieur (poussières, sables, et insectes).

Une ventilation assure une extraction continue de l'air humidifié par l'évaporation de l'eau provenant des produits. La deuxième ventilation est constituée par un brassage de l'air à l'intérieur de la serre. Elle est assurée par des ventilateurs de plafond qui favorise le séchage en créant une vitesse relative entre l'air et le produit.

## Utilisation du séchoir serre

- **Il est interdit de faire fonctionner les ventilateurs sans ouvrir les 2 fenêtres d'entrée d'air. Par contre, les portes doivent être fermées pour éviter l'entrée des insectes.**
- Quand le personnel travaille dans la serre (chargement, brassage), le ventilateur 3 doit être mis en route pour réduire la température à l'intérieur de la serre. Ce ventilateur doit être arrêté quand le personnel n'est plus dans la serre.
- En fonctionnement normal de séchage, les deux ventilateurs 1 et 2 sont utilisés en continu. Il est conseillé :
  - en début de séchage d'utiliser le ventilateur 2 qui a un débit supérieur pour extraire l'humidité du produit,
  - en fin de séchage, d'utiliser le ventilateur 1, son moindre débit permet d'avoir un effet serre plus important (température supérieure à l'intérieure de la serre).
- Il est nécessaire de brasser périodiquement le produit sur les claies. Un brassage toutes les 2 heures doit suffire. Il est souhaitable que la durée du brassage de l'ensemble du produit étalé sur les claies soit courte.
- L'intérêt du séchoir serre réside dans la protection du produit vis-à-vis de l'environnement extérieur, il est donc important que le personnel n'entraîne pas de sables et poussières en rentrant dans la serre.
- Les ventilateurs de plafond doivent fonctionner en continu pendant les périodes de séchage.
- Il est souhaitable de stopper la ventilation d'extraction la nuit en arrêtant le ventilateur d'extraction tard le soir et en le remettant en route tôt le matin.

## *Résumé*

Le Cirad travaille depuis de nombreuses années sur le séchage de produits alimentaires dans les pays en développement et plus particulièrement pour les pays d'Afrique de l'Ouest. Les travaux récents ont conduit au développement de deux types de séchoirs : le séchoir à flux traversant et le séchoir serre. L'activité 3.1 du projet INCO-Fonio montre que l'utilisation d'un séchoir à flux traversant permet d'augmenter le rendement énergétique se traduisant par une réduction de la consommation de gaz donc du coût de cette énergie. Il est trop tôt pour faire une comparaison complète entre les séchoirs à gaz tant que les essais ne sont pas réalisés dans les mêmes conditions (saisons humide ou saison sèche). En dehors de l'avantage de moindre consommation de gaz, le séchoir à flux traversant a une capacité plus importante ce qui se traduit par une réduction du coût d'utilisation.

Par rapport au séchoir FT, le séchoir serre dont les performances sont très intéressantes a des coûts énergétiques bien moindres mais un prix d'achat plus élevé. Il faut aussi attendre les résultats des essais dans les différentes conditions pour comparer avec les autres séchoirs. L'avantage du séchoir serre est la possibilité d'une fabrication locale avec des techniques disponibles ou maîtrisées localement.

### ***Mots clefs :***

Fonio, Séchoir solaire, Séchoir à gaz, Fabrication locale