Projet CFC/ICG - (FIGG/02)
Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio
CIRAD-IER-IRAG-IRSAT

Activité n° 13
Amélioration et conception d'équipements

Etude de principes de séchage du fonio

C. Marouzé
Z. Touaoro
O. Gibert
CIRAD-AMIS
n° 81/01
Novembre 2001

Projet CFC/ICG - (FIGG/02)
Amélioration des Technologies Post-récolte du Fonio
CIRAD-IER-IRAG-IRSAT

Activité n° 13
Amélioration et conception d'équipements

Etude de principes de séchage du fonio

C. Marouzé
Z. Touaoro
O. Gibert
CIRAD-AMIS
n° 81/01
Novembre 2001

Sommaire

I. INTRODUCTION - PRÉSENTATION 1

II. RÉALISATION D'UN ISOTHERME D'ADSORPTION DE FONIO PADDY 1

1. INTRODUCTION 1
2. OBJECTIFS 1
3. MATÉRIEL ET MÉTHODE 1
4. RÉSULTAT ET INTERPRÉTATION 2

III. ESSAIS PRÉALABLES DE SÉCHAGE 3

1. CINÉTIQUE DE SÉCHAGE DU FONIO 3
2. CINÉTIQUE DE SÉCHAGE SOLAIRE DIRECT 4
   2.1. Description des essais 4
   2.2. Résultats des essais 5

IV. SÉCHOIR À CLAIES PERMUTÉES 5

1. PRÉSENTATION DU PRINCIPE ET DESCRIPTION DU SÉCHOIR 5
2. MESURE DE LA VITESSE LIMITE DE PASSAGE D'AIR AU TRAVERS D'UNE COUCHE DE FONIO ET DES PERTES DE CHARGES 6
3. RÉSULTATS 8
4. CONCLUSION SUR LE SÉCHOIR À CLAIES PERMUTÉES 9

V. SÉCHOIR SERRE DOUBLE VENTILATION 9

1. PRÉSENTATION DU PRINCIPE 9
2. DÉMARCHE DE VALIDATION DU PRINCIPE 10
3. PARAMÈTRES DE SÉCHAGE 10
4. RÉSULTATS 11
   4.1. Essai préalable n° 3 du 25 juillet 2001, ... 11
   4.2. Série d'essais 5, 7, 8 et 10 12
5. SIMULATION - CONCLUSION 13

VI. CONCLUSION 14

RÉFÉRENCES 15

ANNEXES 15

I. Introduction - présentation

Le séchage du fonio est une opération essentielle de la transformation et fortement limitante au stade semi-industriel. Dans le cadre du projet Fonio, plusieurs séchoirs sont en tests dans les trois pays partenaires mais une réflexion sur les principes de séchage, menée sans attendre les résultats finaux de ces tests, permettra d'apporter une réponse rapide s'il était nécessaire de modifier des équipements ou de concevoir un séchoir original si les équipements disponibles ne se relevaient pas totalement opérationnels pour le séchage du fonio.

Après des tests préalables pour connaître les cinétiques de séchage soit, en séchage artificiel avec flux d'air chaud traversant la masse de produit soit, en séchage solaire direct, deux principes de séchage seront testés. Le premier est un principe de séchage artificiel, le séchoir à claies permutées, qui présente l'avantage du séchage en couche épaisse, une bonne efficacité thermique. Le deuxième principe est celui du séchoir serre double ventilation, concept original améliorant le principe de séchage utilisé dans les séchoirs banco, tente etc. La validation de ces principes doit permettre de développer de nouveaux séchoirs.

II. Réalisation d'un isotherme d'adsorption de fonio paddy

1. Introduction

La réalisation d'isothermes de sorption (adsorption et désorption) a pour objectif de connaître la répartition et l'intensité des liaisons de l'eau ainsi que sa disponibilité dans les matériaux biologiques. L'isotherme de sorption se définit comme la relation entre l'humidité d'équilibre du produit et l'activité de l'eau à une température donnée. Ce type de relation est essentielle pour la compréhension des propriétés de sorption des aliments, en particulier pour choisir un emballage et prédire la stabilité et les variations potentielles de teneur en eau pendant le stockage.

2. Objectifs

L'objectif de cette expérimentation est la détermination d'un isotherme d'adsorption d'un échantillon de fonio paddy de variété Kenselen guinéene à 30°C. Par lissage à l'aide du model GAB, l'on obtient les constantes caractéristiques du matériau en adsorption et l'on peut ainsi estimer la teneur en eau cible pour en garantir la stabilité au stockage.

3. Matériel et méthode

Un échantillon finement broyé et a été pré-séché en cristallisoir en présence de penta-oxyde di-phosphore (P2O5) pendant 19 jours à température ambiante. Dans ces conditions, la prise d'essai doit posséder une teneur en eau inférieure à 1% et ne présenter aucune altération chimique ou structurale. En présence de solutions salines saturées (HR constante) en bocaux selon les préconisations du groupe COST-91 et 91bis (Groupe Activité de l'eau de l'Union Européenne – Coopération Européenne dans la discipline Scientifique et de la Recherche Technique), les échantillons ont été conditionnées en boîtes à tare (3 répétitions par activité de l'eau) et disposés dans un banc thermostaté à 30°C. Les bocaux ont été au préalable mis sous vide partiel de façon à accélérer l'équilibre de pression de vapeur avec l'ambiance.

A l'issue de la phase d'équilibrage, les boîtes à tare sont pesées et étuvées durant 24 heures à 104°C jusqu'à poids constant.

Les valeurs expérimentales de teneur en eau en base sèche sont reliées à l'activité de l'eau imposée par les solutions salines à l'aide du model GAB qui fournit l'équation caractéristique pour la description de l'isotherme jusqu'à 90% HR(1).

$$\frac{Aw}{X} = \alpha \cdot aw^2 + \beta \cdot aw + \gamma \quad (1)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{K}{X_m} \cdot \left(\frac{1}{C} - 1\right) \; ; \; \beta = \frac{1}{X_m} \cdot \left(1 - \frac{2}{C}\right) \; ; \; \gamma = \frac{1}{X_m \cdot K \cdot C}$$

Où :

X : teneur en eau (% base sèche) ;
Xm : Monocouche – teneur en eau correspondant à l'occupation de tout les sites primaires d'adsorption par molécule d'eau ;
K : facteur de correction pour les multicouches moléculaires ;
C : Constante de Guggenheim.

4. Résultat et interprétation

Les teneurs en eau d'équilibre (%bs) obtenues à 30°C sont données en tableau 1. Les données expérimentales ont été lissées par le model GAB. L'on obtient ainsi l'isotherme caractéristique du paddy à 30°C données en Figure 1. Les coefficients du modèle ont été calculés par régression non linéaire et sont exprimés dans le tableau 2.

Tableau 1 : Teneurs en eau du fonio paddy variété Kenselen à 30°C

Activité de l'eau (30°C)	Teneur en eau (%bs)	Ecart type (%bs)
0.1115	4.6999	0.0984
0.226	6.5080	0.0980
0.3273	8.1314	0.0790
0.4386	9.7325	0.1597
0.577	11.6610	0.0289
0.7083	14.8433	0.5624
0.7532	16.2551	0.2163
0.8432	19.0550	0.0550
0.9086	22.3631	0.2554

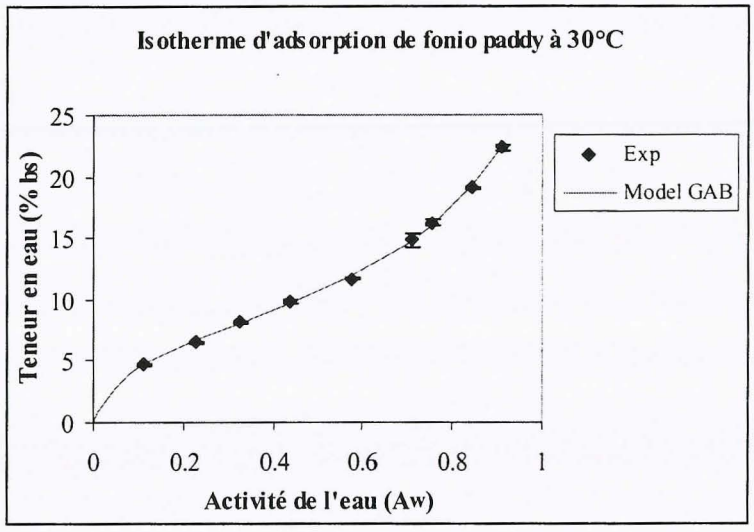


Fig. 1 : Isotherme d'adsorption fonio paddy variété Kenselen à 30°C

Tableau 2 : Constantes du model GAB et coefficients estimés

Température d'équilibre 30°C	
Coefficients de regression GAB estimés	
α * 10	-0.4536
β * 10	1.2007
γ * 10	11.7450
Moyenne des carrés des écarts (%)	0.0171
Constantes GAB	
Teneur en eau de monocouche (Xm)	7.258
Constante de Guggenheim	15.557
Facteur de correction K	0.754

L'écart type entre les valeurs du modèle et les valeurs expérimentales est de 0.14% bs. Le model GAB est parfaitement adapté pour lisser les points expérimentaux. Le fonio paddy doit donc être séché jusqu'à une teneur en eau inférieure à 13.3 %bs. Lors de son stockage, il faut veiller à ce que la teneur en eau du produit ne dépasse pas cette valeur cible.

III. Essais préalables de séchage

1. Cinétique de séchage du fonio

La cinétique est réalisée sur la boucle de séchage du CIRAD avec des paramètres de séchage choisis pour simuler un fonctionnement moyen du séchoir :

Température de séchage :	60 °C
Humidité relative de l'air :	40 %
Vitesse de l'air :	1,5 m/s
Humidité du fonio humide :	71,1 % bs
Et durée de séchage variable :	jusqu'à 120 mn

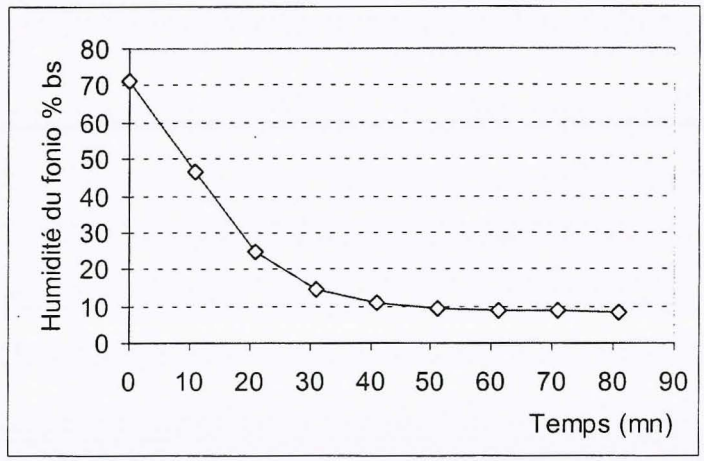


Fig. 1 bis : Cinétique de séchage du fonio réalisée sur boucle de séchage CIRAD

Dans la boucle de séchage, le flux d'air chaud traverse la couche de produit ; tous les grains sont donc en contact direct avec l'air chaud. Ce principe de séchage ainsi que la petitesse des graines explique que le séchage soit rapide avec une teneur en eau inférieure à 10 % bs après 40 mn de séchage.

2. *Cinétique de séchage solaire direct*

2.1. Description des essais

Des essais ont été réalisés à Montpellier pour tracer les cinétiques de séchage du fonio lavé. Le fonio a été préalablement immergé dans l'eau pendant au moins 30 mn puis essoré manuellement dans un tulle. Le séchage est réalisé entre 10 h 50 et 18 h 40 avec les conditions climatiques présentées fig. 7. Lors du séchage le fonio est étalé uniformément sur des claies rectangulaires de dimensions 50 cm x 32 cm. Ces claies grillagées sont revêtues intérieurement d'un tulle fin pour éviter toute perte de produit.

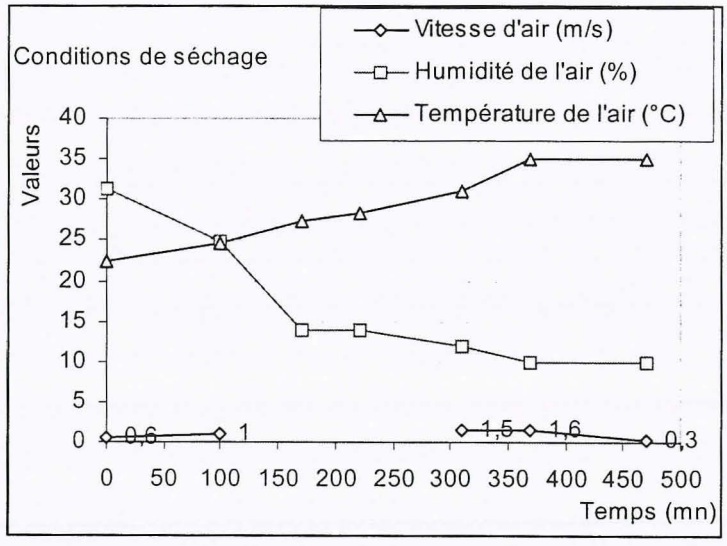


Fig. 7 : Conditions climatiques lors de l'essai de séchage solaire direct.

Les charges des claies sont de 400, 500, 600 ou 800 g ce qui correspond respectivement à des charges de 2,5 / 3,1 / 3,75 / 5 kg/m². Pour la moitié des claies, le fonio

SECHAGE SOLAIRE DIRECT

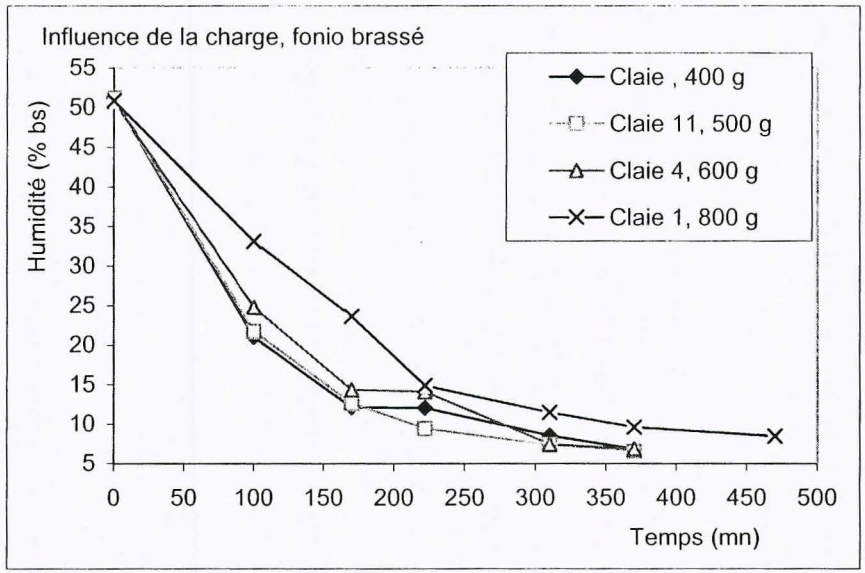


Fig. 2 : Cinétiques de séchage montrant l'Influence de la charge, fonio brassé

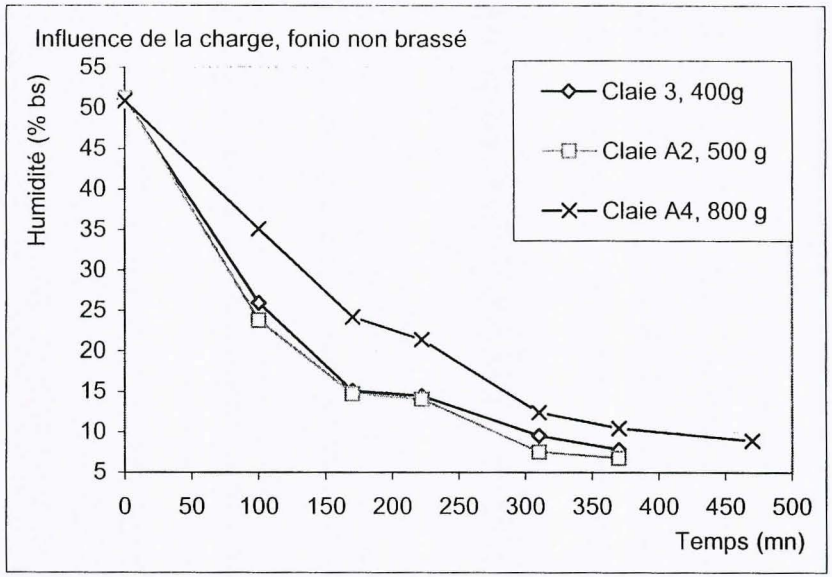


Fig. 3 : Cinétiques de séchage montrant l'Influence de la charge, fonio non brassé

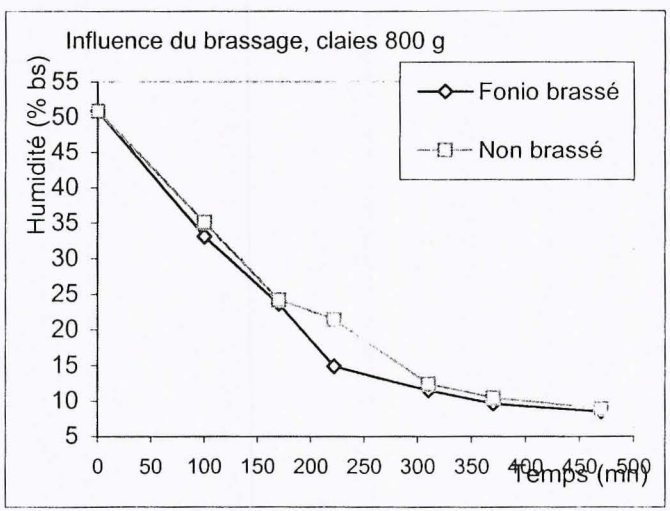


Fig. 4 : Cinétiques de séchage montrant l'influence du brassage pour une charge de 800 g

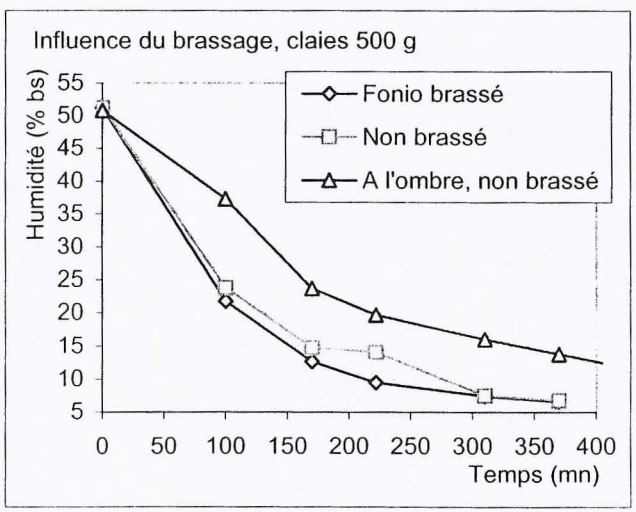


Fig. 5 : Cinétiques de séchage montrant l'influence du brassage pour une charge de 500 g

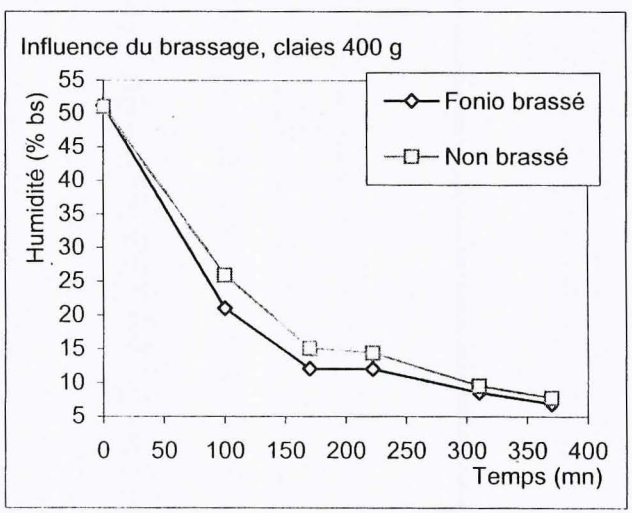


Fig. 6 : Cinétiques de séchage montrant l'influence du brassage pour une charge de 400 g

est brassé (1 brassage toutes les 2 heures) alors qu'il ne l'est pas pour l'autre moitié. Une claie est disposée à l'ombre pour observer, par différence, l'effet du rayonnement direct sur le séchage.

2.2. Résultats des essais

L'humidité initiale du fonio lavé est de l'ordre de 50 % bs. Les cinétiques de séchage sont conformes aux attentes avec une première phase de séchage rapide et une seconde où la perte en eau est moindre. Les conditions de séchage étant favorables, la durée de séchage est courte ; pour les claies les moins chargées ; une teneur en eau de 10 % bs est obtenue au bout de 4 à 5 h alors que pour les autres claies, il faut 6 à 7 h.

Les fig. 2 et 3 montrent l'influence de la charge sur la cinétique de séchage quand le fonio est brassé (fig. 2) ou non (fig. 3). On observe un faible écart de vitesse de séchage entre les claies chargées de 400 et 500 g de fonio voire de 600 g. Par contre, les claies chargées de 800 g ont une vitesse de séchage nettement plus faible.

Les fig. 4 à 6 montrent l'influence du brassage : une vitesse de séchage plus rapide est notée pour le fonio brassé mais l'écart n'est jamais très important et l'écart final d'humidité est inférieur à 1 %. Par contre, la claie chargée de 500 g de fonio et placée à l'ombre sèche beaucoup moins rapidement que la claie disposée au soleil.

IV. Séchoir à claies permutées

1. Présentation du principe et description du séchoir

Le séchage par entraînement est d'autant plus efficace et plus rapide que l'air chaud est directement en contact avec les particules élémentaires. Un air chaud traversant la masse de produit permet un séchage plus rapide qu'un léchage d'une couche de produit car l'air chaud est directement en contact avec tous les grains ce qui facilite l'échange thermique et massique. Le séchoir à claies permutées est basé sur ce principe, l'air traverse la masse de grains.

Dans le séchoir à claies permutées, le produit et l'air chaud circulent à contre-courant c'est à dire qu'ils ont la même direction mais un sens de déplacement opposé (voir fig. 8). Cette disposition permet un épuisement de l'énergie de l'air chaud qui ressort normalement saturé en vapeur d'eau. Le flux d'air est ascendant alors que le fonio descend. Il ne s'agit pas réellement d'un flux des grains mais de grains placés dans des claies qui sont permutées ; la claie contenant le grain humide est placée au-dessus (position claie B de la fig. 9), alors que la claie contenant le grain pré-séché est placée en dessous (position claie A de la fig. 9).

Le séchoir comporte :

- Une enceinte de chauffage avec un brûleur à gaz. L'enceinte qui est ouverte sur un côté assure le mélange des gaz de combustion et de l'air froid, le mélange étant aspiré en partie haute de l'enceinte. Il est possible de régler la puissance de chauffe en réglant le débit de gaz.
- Un ventilateur qui aspire l'air chaud dans l'enceinte et le refoule au bas de la colonne de séchage. Le débit d'air chaud est réglable par variation de la vitesse du ventilateur .
- Une colonne de séchage constitué d'un répartiteur d'air et de claies empilées. Le diamètre des claies est de 400 mm.

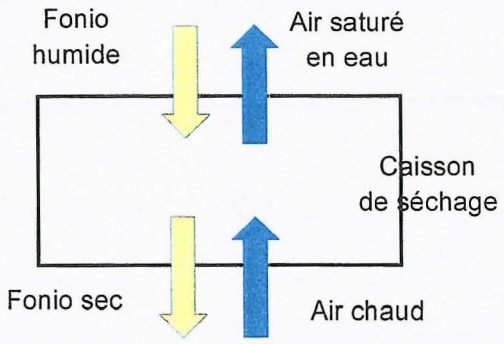


Fig. 8 : Principe des flux croisés utilisés sur le séchoir à claies permutées

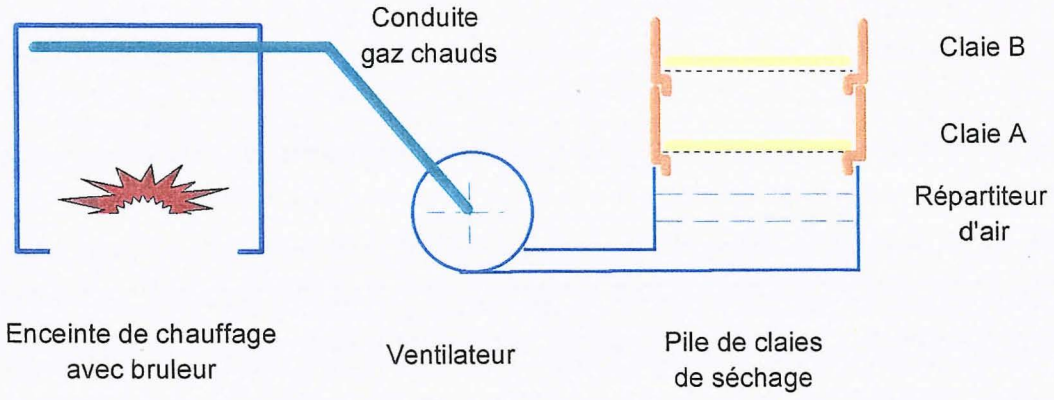


Fig. 9 : Schéma du séchoir à claies permutées

2. *Mesure de la vitesse limite de passage d'air au travers d'une couche de fonio et des pertes de charges*

Dans le séchoir à claies permutées, le flux d'air ascendant ne doit pas déplacer les graines afin de ne pas créer des passages préférentiels d'air dans la masse de grains. Il faut donc déterminer la vitesse maximale de passage de l'air au travers d'une couche de fonio sans qu'il y ait de déplacement de graines, appelée vitesse limite, pour avoir un séchage homogène et la plus grande vitesse de séchage possible. De plus, la connaissance des pertes de charge permettra un dimensionnement rationnel du ventilateur.

Les mesures ont été effectuées sur une colonne cylindrique verticale de diamètre 150 mm alimentée en amont par un ventilateur centrifuge. Les vitesses limites sont mesurées pour différentes épaisseurs de couche de fonio et pour les fonios paddy et décortiqué secs car les graines sèches sont plus légères. Les résultats sont présentés dans les tabl. 10 et 11.

La vitesse limite est faible (de l'ordre de 0,2 m/s) et la forme de la courbe dépend de la nature du grain (paddy ou décortiqué). La perte de charge est proportionnelle à l'épaisseur de la couche de fonio et elle est plus importante pour le fonio décortiqué que pour le fonio paddy

mais elle est peu élevée compte tenu de la faible vitesse de l'air. Le fonctionnement d'un séchoir à claies permutées sera donc contraint par cette faible vitesse de passage de l'air qui limite le débit d'air donc la puissance de chauffe.

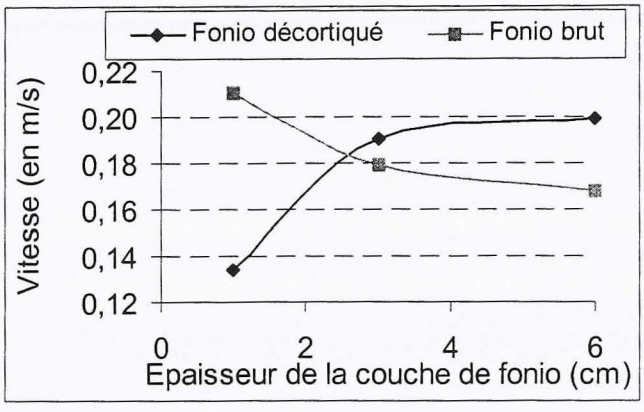


Fig. 10 : Vitesses limites de passage d'air au travers d'une couche de fonio

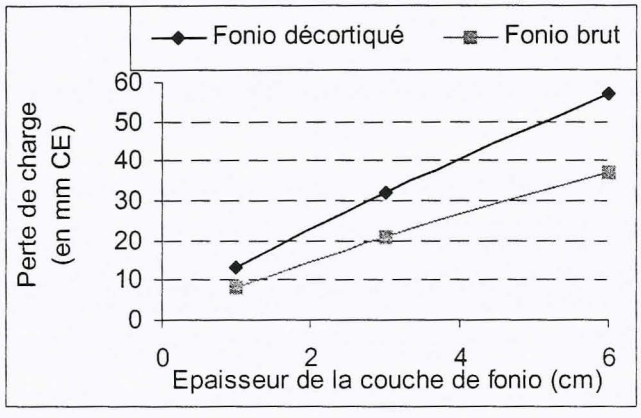


Fig. 11 : Pertes de charge d'un flux d'air au travers d'une couche de fonio.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de Amenhar (2000). Pour le fonio humide la vitesse limite est beaucoup plus élevée alors que la perte de charge évolue faiblement.

	Fonio humide	Fonio sec
Humidité	31 % bh	8.91 % bh
Vlim (m/s)	0,509	0,181
P (Pa)	294	169.
masse de produit (g)	500	600
hauteur du produit (cm)	5	4

Tabl. 3 : Comparaison des vitesses limite pour le fonio sec et humide (Amenhar, 2000)

La vitesse d'envolement des graines de fonio, correspondant à la vitesse du flux d'air vertical dans lequel les graines restent en flottation, est assez élevée pour une graine aussi petite. Elle a été mesurée pour le dimensionnement de dispositifs de nettoyage de grain (Buffetaud, 2000).

Vitesse d'envolement du fonio	en m/s
Fonio paddy	3,01
Fonio décortiqué aux rouleaux	3,41

Tabl. 4 : Mesure de la vitesse d'envolement du fonio.

3. *Résultats*

Les essais ont été réalisés avec du fonio paddy préalablement lavé. Lors du premier essai, une seule claie était disposée sur le séchoir (position A) alors que pour le deuxième essai deux claies étaient disposées sur le séchoir avec une permutation de leur position à chaque séquence selon les indications du tableau ci-dessous. La claie 1 de l'essai du 2ème essai n'ayant pas été séchée avec une permutation des claies, sa cinétique de séchage n'est pas présentée.

Position sur le séchoir	1ère Séquence	2ème Séquence	3ème Séquence	4ème Séquence	5ème Séquence
Position B	2	3	4	5	
Position A	1	2	3	4	5

Tabl. 5 : Permutation des claies pour le 2ème essai

Paramètres de séchage du 1er essai :

- Une seule claie sur le séchoir
- Température de l'air 95 °C
- Vitesse de l'air sous les claies 0,36 m/s
- Masse de fonio à sécher par claies 2 kg soit 16 kg/m²

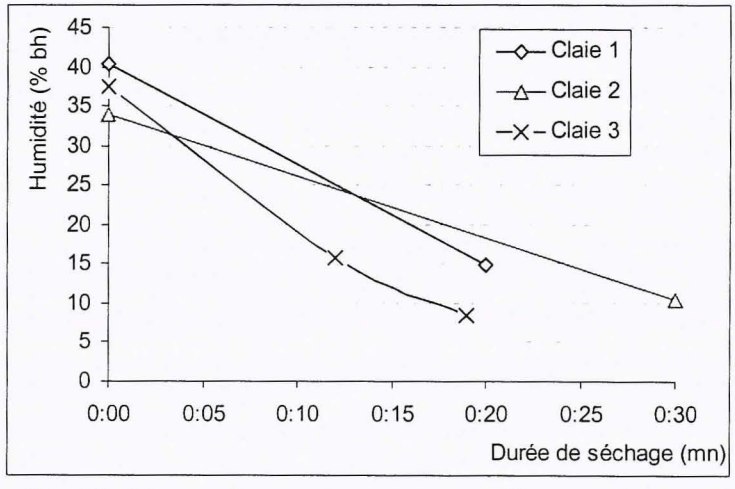


Fig. 12 : Cinétiques de pertes en eau en utilisant qu'une seule claie

Le séchage est rapide ; une durée de séchage de 20 à 30 mn permet de descendre l'humidité du fonio en dessous de 10 % bs. Le fonio en contact avec le tamis sèche en premier et un front de séchage se déplace du-dessous vers le dessus de la couche de fonio. Le fonio doit être réparti de façon homogène dans la claie pour éviter les passages préférentiels d'air.

Paramètres de séchage du 2ème essai:

- 2 claies sur le séchoir avec permutation
- Température de l'air 105 °C
- Vitesse de l'air sous les claies 0,37 m/s

- Masse de fonio à sécher par claies 1,7 kg soit 13,5 kg/m²

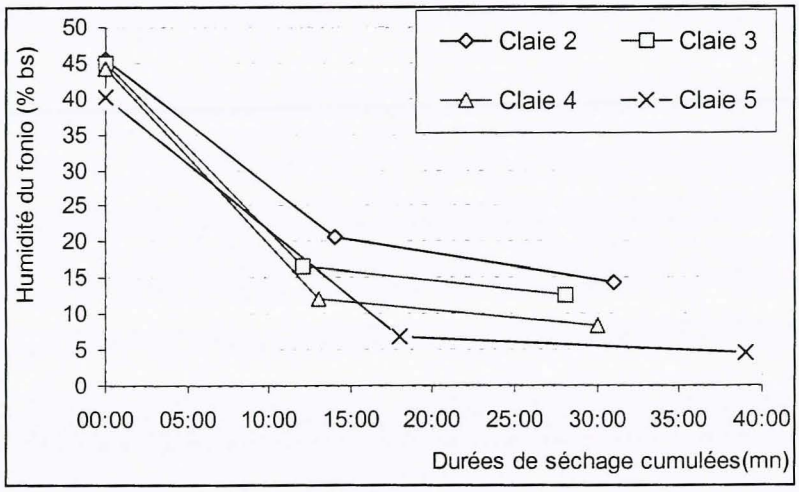


Fig. 13 : Cinétiques de perte en eau avec le séchoir utilisant deux claies

Pour le séchage avec permutation des claies, la durée de chaque séquence de séchage est d'environ 15 mn soit un séchage en environ 30 mn. En position A sur le séchoir, est réalisé un séchage final avec le fonio passant d'environ 15 % à moins de 10 % d'humidité. En position B est réalisé un pré-séchage avec une perte en eau importante et une saturation en vapeur de l'air.

4. *Conclusion sur le séchoir à claies permutées*

Le principe du séchoir à claies permutées est validé avec une teneur en eau du fonio égale ou inférieure à 10 % et un bon épuisement de l'air chaud. Il faudra éviter des températures d'air chaud trop élevées pour éviter de porter le fonio sec à une trop haute température.

En décembre 2000, ces travaux ont été présentés au séminaire de Bamako sur les activités de conception d'équipements. Les participants ont émis des doutes sur la possibilité de développement de ce principe de séchoir compte tenu de la nécessité de permuter les claies qui est une contrainte pour les transformatrices. En conséquence, les travaux ont été suspendus en attentant les résultats des autres séchoirs en cours de tests.

V. Séchoir serre double ventilation

CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette

1. *Présentation du principe*

En partant du constat que la principale limite rencontrée par lors du séchage solaire pratiqué dans les tentes solaires, séchoirs banco, voire séchoir tunnel, est la durée excessivement longue du séchage qui ne permet pas d'avoir une qualité satisfaisante des produits, il est proposé un concept de séchoir serre double ventilation où la circulation d'air serait maîtrisée :

- d'une part, par une extraction d'air ventilé pour évacuer vers l'extérieur du séchoir la vapeur d'eau issue du produit,

- d'autre part, par un brassage de l'air à l'intérieur de la serre assurant à la fois une homogénéité de température et d'humidité de l'air ambiant et aussi une vitesse relative entre l'air et le produit facteur favorable au séchage. Ce brassage serait assuré par des ventilateurs de plafond.

Le séchoir serait un séchoir existant de type séchoir tunnel ou une serre agricole équipée d'un ventilateur d'extraction d'air et de ventilateurs de plafond pour brasser l'air.

Les avantages attendus de ce principe de séchage sont les suivants :
Par rapport au séchage solaire traditionnel,
- réduction de la durée de séchage,
- protection contre la pollution atmosphérique,
- réduction des manipulations car il n'est pas nécessaire de rentrer le produit le soir pour éviter les reprises d'humidité,

Par rapport au séchage artificiel,
- séchage à température légèrement supérieure à la température ambiante évitant toute dégradation du produit à cause d'une température excessive,
- utilisation de l'énergie solaire donc économie d'énergie.

2. *Démarche de validation du principe*

L'objectif de ce travail n'est pas de tester un séchoir serre double ventilation mais simplement d'en valider le principe. Si, et seulement si, le principe est validé, il sera alors possible de construire un séchoir serre double ventilation chez un transformateur de la zone de transformation de fonio intéressé par le procédé. S'il est possible de sécher le fonio lavé (ou du fonio pré-cuit) en 8 h ou moins, soit une journée de séchage, le principe sera validé. Si la durée de séchage est plus longue ou qu'il ne soit pas possible de descendre en dessous de 13 % d'humidité bs, il n'y aura qu'un gain faible sur la durée de séchage par rapport aux techniques de séchage existantes donc pas d'intérêt de développer ce type d'équipement. La plupart des essais a été réalisée avec du fonio lavé ayant une humidité de 50 à 55 % b.s.

Pour valider le principe, des essais seront réalisés sur le séchoir UTA du CIRAD dans lequel l'air de séchage lèche les claies avec une maîtrise des paramètres de séchage (température, vitesse et humidité de l'air et charge de fonio par claie). Ces paramètres sont définis les plus proches possible de ce qu'ils pourraient être dans un séchoir serre double ventilation donc en fonction des conditions climatiques[1].

Les claies du séchoir UTA sont des claies rectangulaires de dimensions 50 cm x 32 cm. Ces claies grillagées sont revêtues intérieurement d'un film plastique ou d'un tulle fin pour éviter toute perte de produit. Les charges des claies sont de 400, 500, 600, 800 ou 1000 g ce qui correspond respectivement à des charges de 2,5 / 3,1 / 3,75 / 5 / 6,5 kg/m². Pour mesurer l'influence du brassage, le fonio est brassé (2 brassages durant le séchage en général) pour une moitié des claies alors qu'il ne l'est pas pour l'autre moitié de claies.

3. *Paramètres de séchage*

[1] Des conditions peu favorables seront considérées, c'est en effet durant la période critique de la saison des pluies que le séchage solaire (direct ou autre) est le plus délicat à réaliser.

Les paramètres sont ceux que l'on pourra rencontrer dans une serre double ventilation qui pourrait être installée dans le zone de transformation du fonio :

Température de l'air = température légèrement supérieure (à cause de l'effet de serre) à la température ambiante moyenne dans la période 9 - 17 h,

Humidité de l'air = humidité légèrement inférieure (à cause de l'augmentation de température) à l'humidité ambiante moyenne de l'air dans la période 9 - 17 h,

Vitesse de l'air = vitesse de l'air brassé par un ventilateur de plafond soit environ 1 m/s,

Charge de produit par m² similaire à la charge utilisée en séchage traditionnel, 2,5 à 5 kg/m².

4. *Résultats*

4.1. Essai préalable n° 3 du 25 juillet 2001,

Paramètres de l'essai :

* Produit : fonio décortiqué lavé
* Séchage sans brassage du fonio
* Humidité relative de l'air : 50 %
* Température de l'air : 36 °C
* Vitesse de l'air : 1m/s
* 4 claies de 1 / 0,5 et 0,44 kg

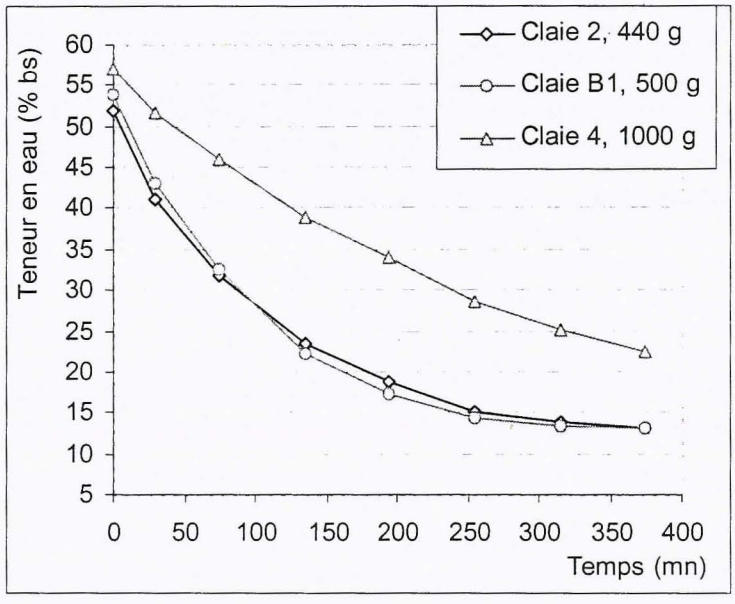


Fig. 14 : Cinétiques de perte en eau pour l'essai préalable 3 du 25 07 01

Les cinétiques de séchage pour les claies chargées de 440 et 500 g ont une allure caractéristiques avec une perte en eau importante au début puis plus faible. La teneur en eau finale est comprise entre 12 et 13 % bs. La vitesse de séchage pour la claie chargée de 1 kg soit 6,45 kg/m² est faible et l'humidité finale du fonio est de 22,5 %, cette charge paraît trop importante. Les essais suivants seront réalisés sur une durée plus longue et avec des charges par claies comprises entre :

- 0,4 kg, soit 2,5 kg/m²,
- 0,8 kg, soit 5 kg/m².

4.2. Série d'essais 5, 7, 8 et 10

Pour les essais réalisés sur le séchoir UTA (essais 5, 7, 8 et 10), les conditions de séchage (température, humidité et vitesse de l'air) sont données par les trois figures 15, 16 et 17. L'essai 5 est réalisé avec des conditions de séchage peu favorables ; température de l'ordre de 30 °C, humidité de l'air 50 %. L'essai 7 est réalisé avec des conditions beaucoup plus favorables avec une température de l'ordre de 40 °C et une humidité de l'air comprise entre 30 et 35 %. L'essai 8 est réalisé avec des conditions peu favorables avec une température de 36 °C et une humidité de l'air comprise entre 45 et 60 % en fin d'essai. L'essai 10 est réalisé avec une température de 40 °C et une humidité de l'air allant de 60 à 50 %. Pour tous les essais la vitesse d'air est comprise entre 1 et 1,3 m/s, vitesse qui évite tout entraînement de graines par l'air. L'essai 10 compare le séchage du fonio lavé et du fonio cuit à la vapeur.

Essai 5 du 7 août 2001,
Paramètres de l'essai :

* Produit :	fonio décortiqué lavé
* Séchage	avec (2 brassages lors des pesées à t = 188 et 250 mn) et sans brassage du produit
* 4 claies de	0,5 et 0,8 kg

Les fig. 18 et 19 montrent l'effet du brassage : le fonio brassé sèche plus vite que le fonio non brassé. La durée du séchage n'est pas suffisante pour que les claies les moins chargées soient sèches en fin de séchage (humidité finale comprise entre 13 et 15 % bs pour les claies chargées à 500 g et la claie B1). Néanmoins, ces résultats sont très encourageants car la température de l'air n'est que de 30 °C.

Les fig. 20 et 21 montent l'influence de la charge : à l'exception de la claie B1, les claies chargées à 800 g sèchent plus lentement et la teneur en eau finale est plus élevée (18 à 21 % bs) que pour les claies chargées à 500 g.

Essai 7 du 16 août 2001
Paramètres de l'essai :

* Produit :	fonio décortiqué lavé
* Séchage	avec (2 brassages lors des pesées à t = 120 et 215 mn) et sans brassage du produit
* 4 claies de	500, 600 et 800 g

Pour la majorité des claies la teneur en eau finale est de 10 % bs pour une durée de séchage de 445 mn soit 7 h 30, il est donc possible de sécher du fonio avec les paramètres de séchage de cet essai. Pour 4 claies « brassées », la teneur en eau et inférieure à 12 % après 5 h 25 de séchage seulement.

La fig. 22 montre, pour le fonio brassé deux fois durant le séchage, l'influence de la charge de la claie ; plus la claie est chargée, moins le séchage est rapide. L'humidité finale est de 10 % pour toutes les claies sauf pour une claie chargée de 800 g (teneur en eau finale de 12 %). La fig. 23 montre la même tendance pour le fonio non brassé, la claie 2 (charge de 600 g) a une teneur en eau finale de 13%.

La fig. 24 montre clairement l'effet du brassage pour une charge de 500 g, le gain sur la vitesse de séchage est significatif. La fig. 25 montre que le séchage dans la claie pleine

Comparaison des conditions de séchage des essais 5, 7, 8 et 10

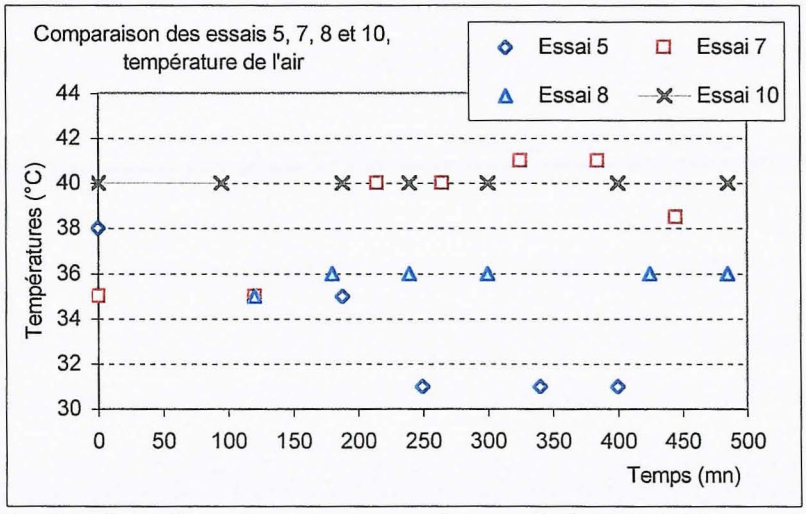


Fig. 15 : Conditions de séchage pour les essais 5, 7, 8 et 10, température

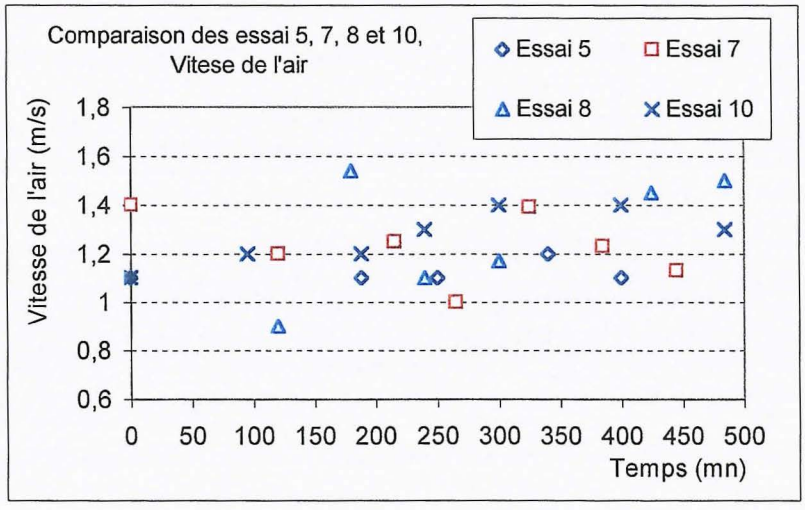


Fig. 16 : Conditions de séchage pour les essais 5, 7, 8 et 10, vitesse de l'air

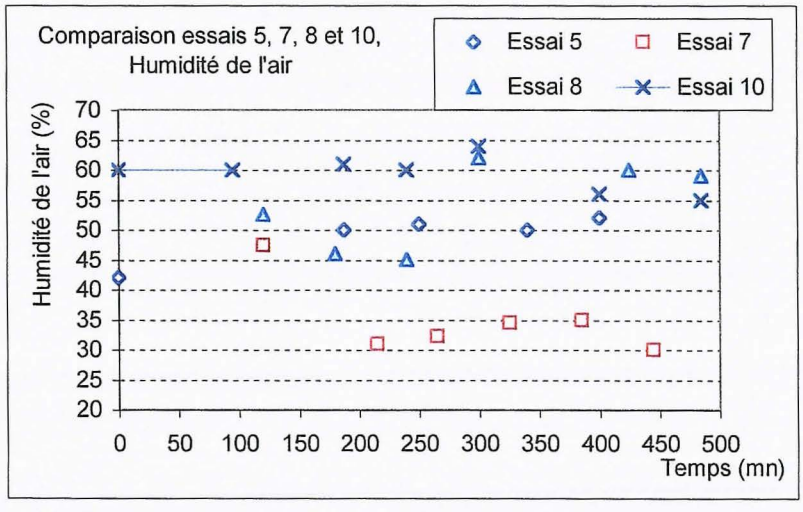


Fig. 17 : Conditions de séchage pour les essais 5, 7, 8 et 10, humidité de l'air

Essai 5

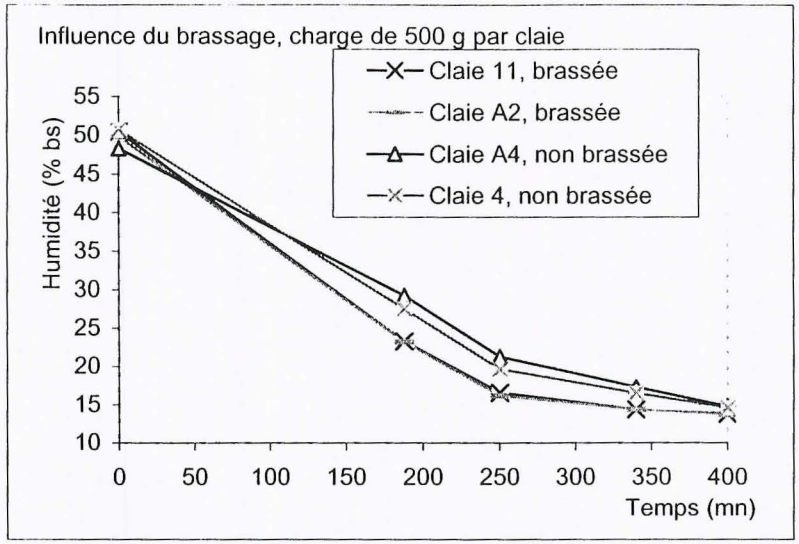


Fig. 18 : Essai 5, Influence du brassage, charge de 500 g

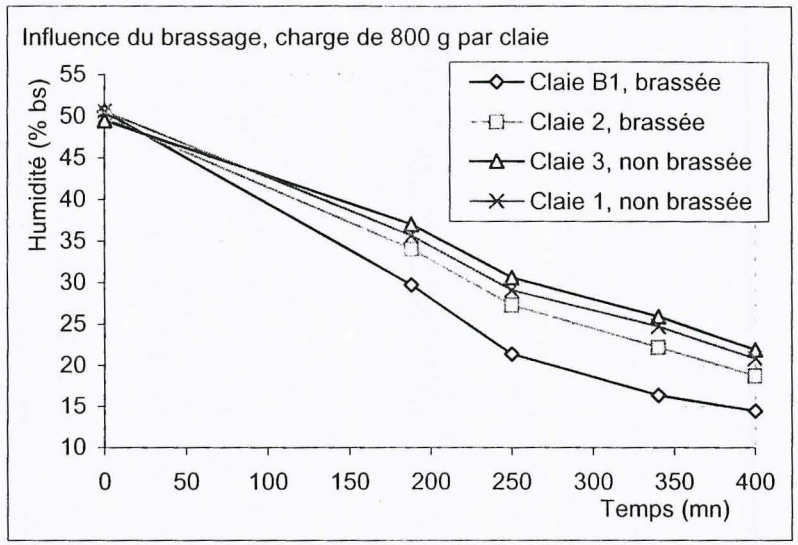


Fig. 19 : Essai 5, Influence du brassage, charge de 800 g

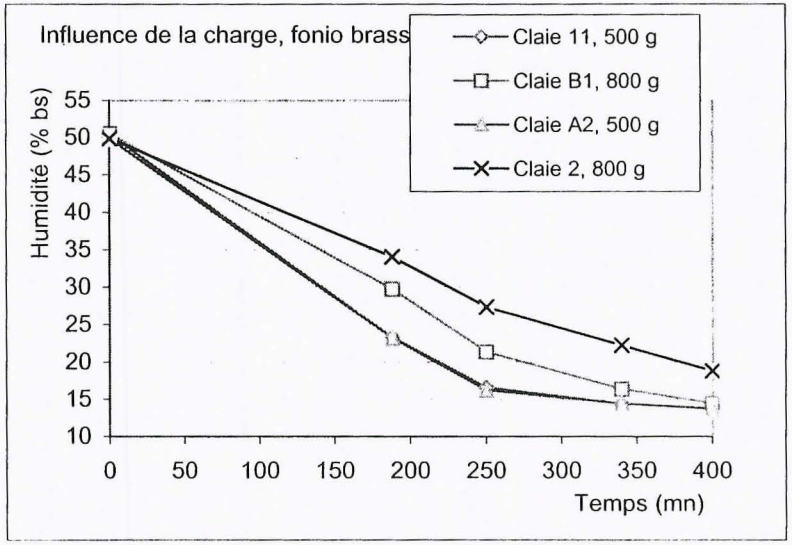


Fig. 20 : Essai 5, Influence de la charge, fonio brassé

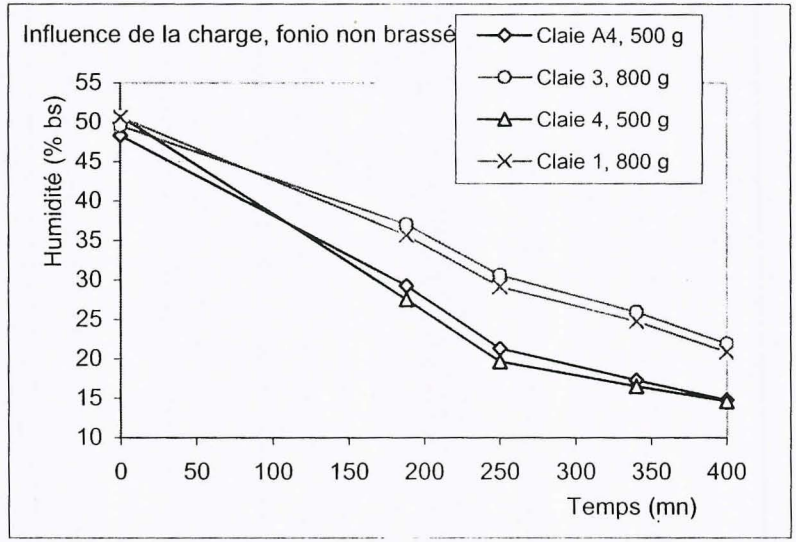


Fig. 21 : Essai 5, Influence de la charge, fonio non brassé

Essai 7

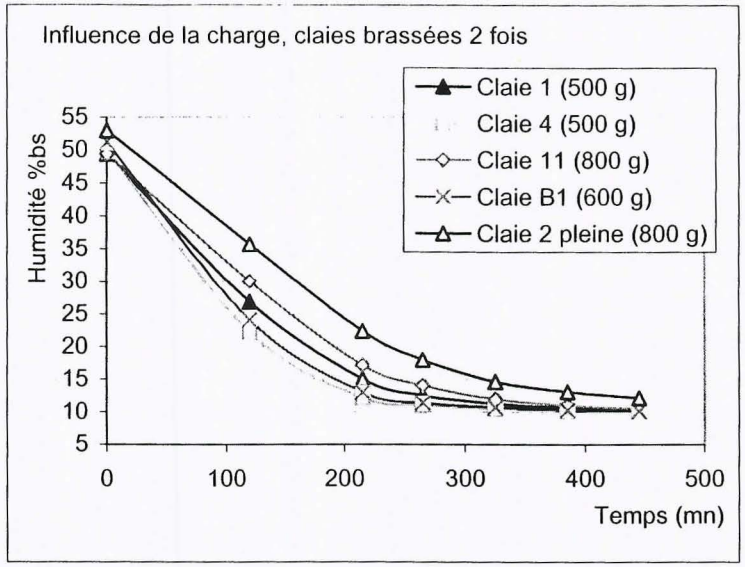


Fig. 22 : Essai 7, influence de la charge, fonio brassé

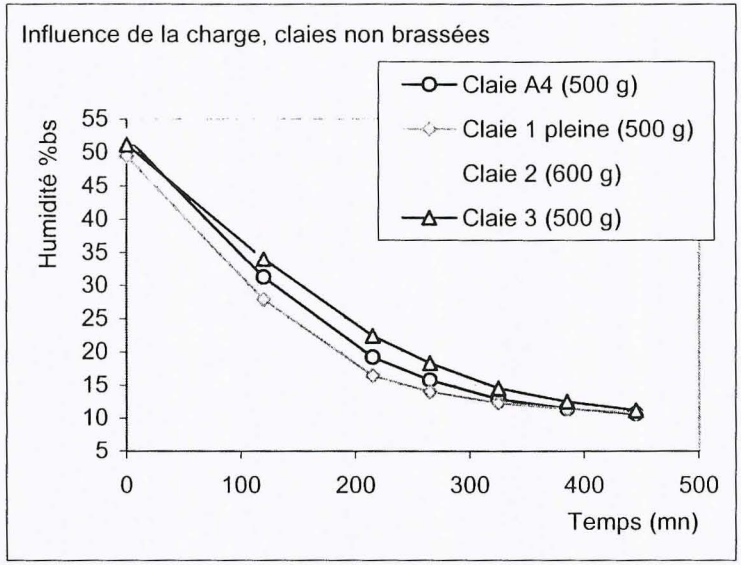


Fig.23 : Essai 7, influence de la charge, fonio non brassé

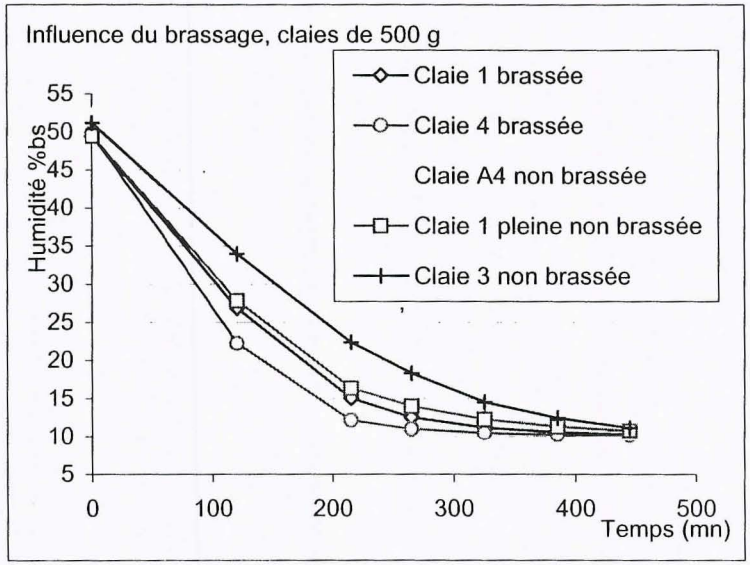


Fig. 24 : Essai 7, influence du brassage, claie de 500 g

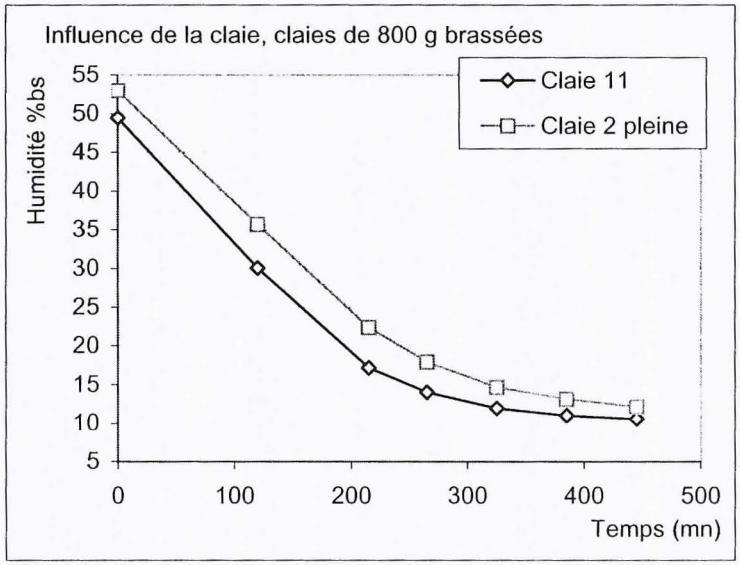


Fig. 25 : Essai 7, influence de la claie

Essai 8

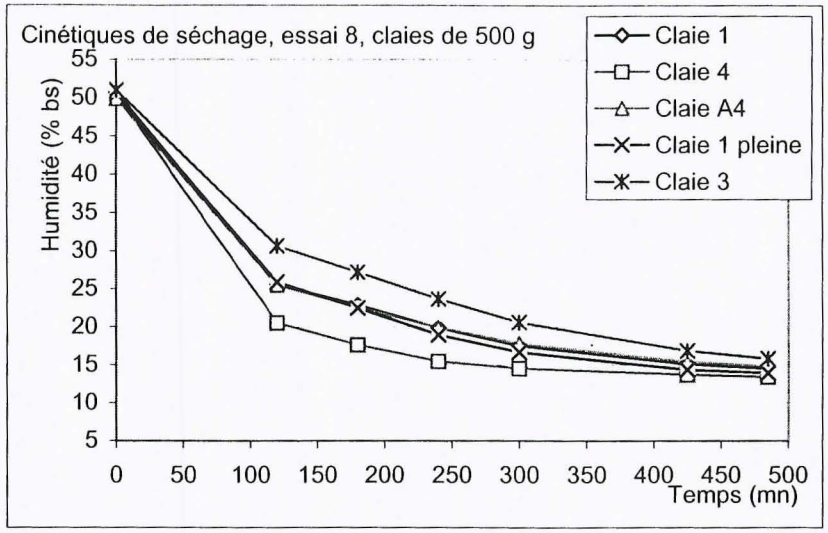


Fig. 26 : Cinétiques de séchage de l'essai 8, charge par claie 500 g, fonio non brassé

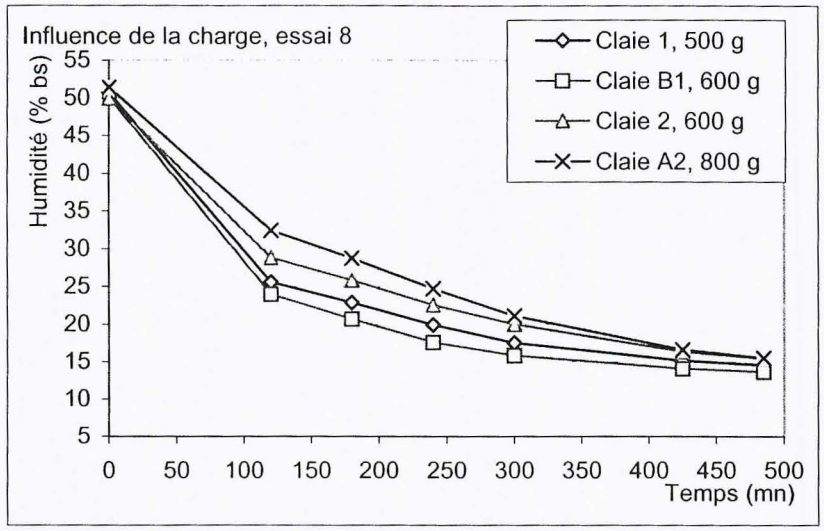


Fig. 27 : Essai 8, cinétiques de séchage, influence de la charge

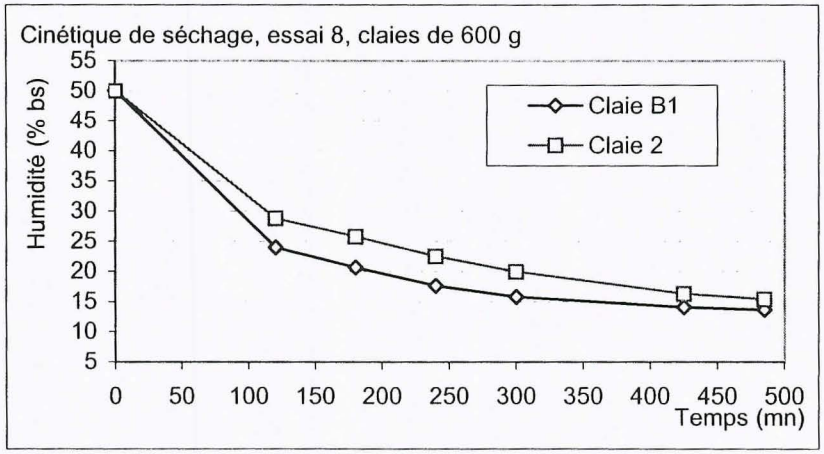


Fig. 28 : Cinétiques de séchage de l'essai 8, charge par claie 600 g, fonio non brassé

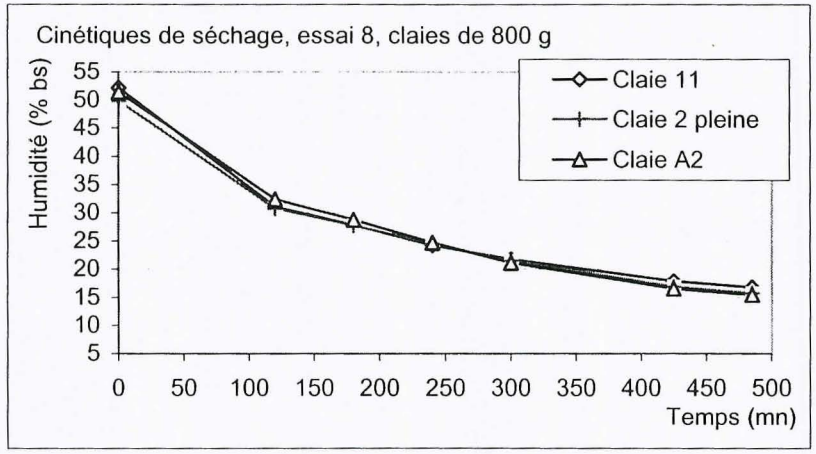


Fig. 29 : Cinétiques de séchage de l'essai 8, charge par claie 800 g, fonio non brassé

Essai 10

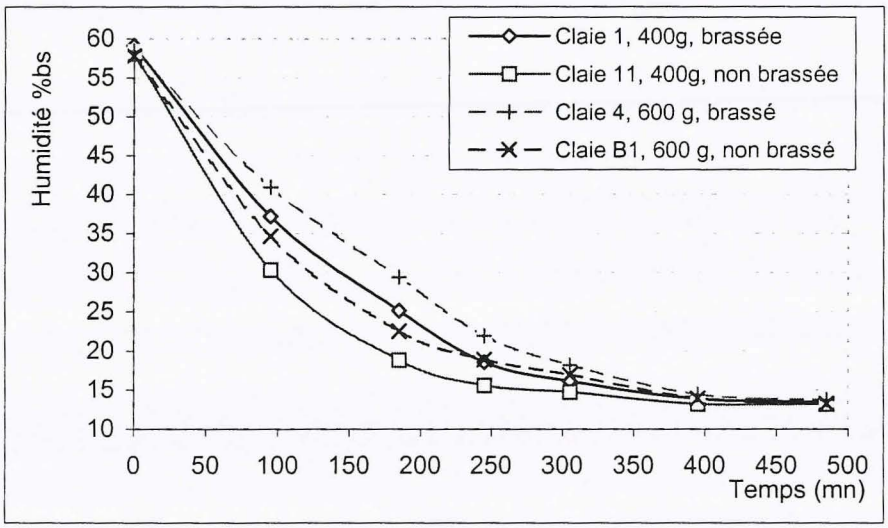


Fig. 30 : Essai 10, fonio cuit, influence du brassage et de la charge sur la cinétique de séchage

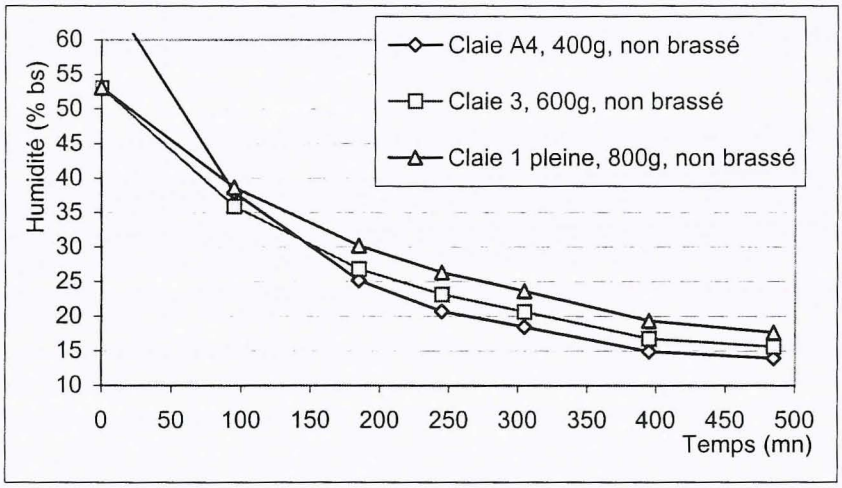


Fig 31 : Essai 10, fonio lavé, influence de la charge

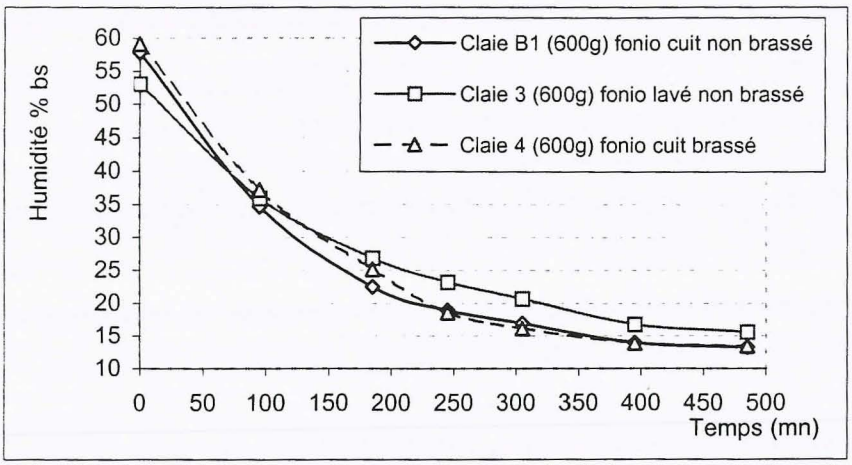


Fig. 32 : Essai 10, comparaison séchage du fonio lavé et du fonio cuit

constituée d'une tôle avec un rebord de 40 mm est moins rapide que dans une claie grillagée revêtue d'un tulle.

Essai 8 du 21 août 2001

Paramètres de l'essai :

* Produit :	fonio décortiqué lavé
* Séchage	sans brassage du produit
* 4 claies de	500, 600 et 800 g

Cet essai a été réalisé sans brassage et avec des conditions de séchage pas trop favorables en particulier une humidité de l'air de 60 % dans la deuxième partie de l'essai ; la teneur en eau finale est voisine ou supérieure à 15 % bs après 8 h de séchage ; le séchage n'est donc pas terminé. Cet essai confirme, malgré quelques dispersions de résultats (fig. 27), les résultats obtenus pour les essais précédents concernant la charge par claie (fig. 27) ; vitesse de séchage d'autant plus rapide que la claie est peu chargée mais les écarts sont faibles sur la teneur en eau finale. Une humidité de l'air de 60 % ne permet pas d'atteindre la teneur en eau finale souhaitée.

Essai 10 du 29 août 2001

Paramètres de l'essai :

* Produit :	fonio décortiqué lavé et fonio cuit
* Séchage	avec (2 brassages lors des pesées à t = 180 et 305 mn) et sans brassage du produit
* 4 claies de	400, 500 et 800 g

Cet essai compare le séchage du fonio lavé et du fonio cuit, il confirme l'influence de la charge observée pour les essais précédents (fig. 30 et 31). La teneur en eau finale pour le fonio cuit est de 13 % bs, ceci est à mettre en relation avec l'humidité finale de l'air qui était de 55 % pour la phase finale de séchage.

Dans les mêmes conditions de séchage, le fonio cuit sèche plus rapidement que le fonio lavé (non cuit) et sa teneur en eau est plus faible (fig. 32).

5. Simulation - conclusion

Une simulation de séchage dans un séchoir serre double ventilation pour un séchoir ayant les caractéristiques suivantes :

Surface du séchoir :	80 m²
Surface de claies	60 m²
Charge des claies	3,75 ou 5 kg/m²
Quantité d'eau à évaporer	48,2 ou 64 kg par jour si l'on fait un batch par jour
Débit d'air d'extraction	500 m3/h
Quantité de fonio sec	125 ou 169 kg

Et dans les conditions climatiques de :

Température de l'air ambiant	30 °C
Humidité de l'air :	80 %

...nous donne les valeurs théoriques suivantes pour :

Capacité évaporatoire	100 kg d'eau /j

Humidité finale de l'air	50 % en sortie de séchoir
Température finale de l'air	52 °C en sortie de séchoir

Ceci devrait nous donner des valeurs moyennes à l'intérieur du séchoir de :

Humidité de l'air	50 %
Température de l'air	45 °C

Par rapport à cette simulation de fonctionnement d'un séchoir serre double ventilation, les paramètres de séchage de l'essai 7 sont plus favorables en terme d'humidité de l'air (30 – 35 %) et moins favorables en terme de température (40 °C). Les paramètres de séchage des essais 5, 8 et 10 sont nettement moins favorables que ceux de la simulation. Les cinétiques de séchage obtenues lors de ces essais indiquent que le séchage dans une serre double ventilation permet le séchage du fonio en moins de 8 h car la capacité évaporatoire donnée par la simulation est presque le double de celle réellement nécessaire, même avec une humidité élevée de l'air ambiant. Un essai avec les paramètres de séchage humidité de l'air 50 % et température de l'air 45 °C devrait définitivement valider ce principe.

Le débit d'air d'extraction doit être limité pour avoir un effet de serre important et un écart significatif de température entre l'air intérieur et l'air extérieur du séchoir, un débit réduit améliore la capacité évaporatoire. Les conditions de séchage sont compatibles avec le mode de fonctionnement de ce type de séchoir car on rencontre souvent à l'intérieur de séchoirs banco ou tunnel des températures supérieures de 20°C à la température extérieure. Pour le chargement et déchargement des produits, il est possible de ventiler fortement le séchoir pour réduire la température intérieure.

VI. Conclusion

Cette étude valide les deux principes de séchage : séchoir à claies permutées et séchoir serre double ventilation. Il faut rappeler que le séchage du fonio est facile car la quantité d'eau à éliminer du fonio précuit est faible.

Les travaux sur le séchoir à claies permutées ont été présentés au séminaire de Bamako sur les activités de conception d'équipements. Dans l'état actuel des connaissances, l'utilisation de ce type de séchoir ne présente pas d'avantage déterminant par rapport au séchoir FAC 2000 fabriqué au Mali, néanmoins, le rendement thermique du séchoir à claies permutées devrait lui apporter un avantage significatif si le coût de l'énergie augmente.

Avec une réduction significative de la durée de séchage, le séchoir solaire double ventilation présente des avantages spécifiques par rapport aux séchoirs solaires classiques à ventilation naturelle. Les performances ont été validées pour des conditions climatiques peu favorables. Le surcoût lié à la ventilation est compensé, à surface de séchage identique, par une augmentation de la quantité traitée. Ce type de séchoir devrait intéresser les transformateurs ayant une production journalière de quelques centaines de kg de fonio.

Références

Amenhar, R., 2000. Séchage du fonio et du sésame, essais de principes. Montpellier: CIRAD-AMIS.

Buffetaud, B., 2000. Recherche de principes de nettoyage de graines de fonio. Montpellier: CIRAD-AMIS n° 35/2000 / IUP de Montpellier GMP 3ème année.

Rozis, J.F., 1995. *Sécher les produits alimentaires. Techniques, procédés, équipements, Collection LE POINT SUR. GRET Guide technique. GRET - Ministère de la Coopération - CTA.*

Annexes

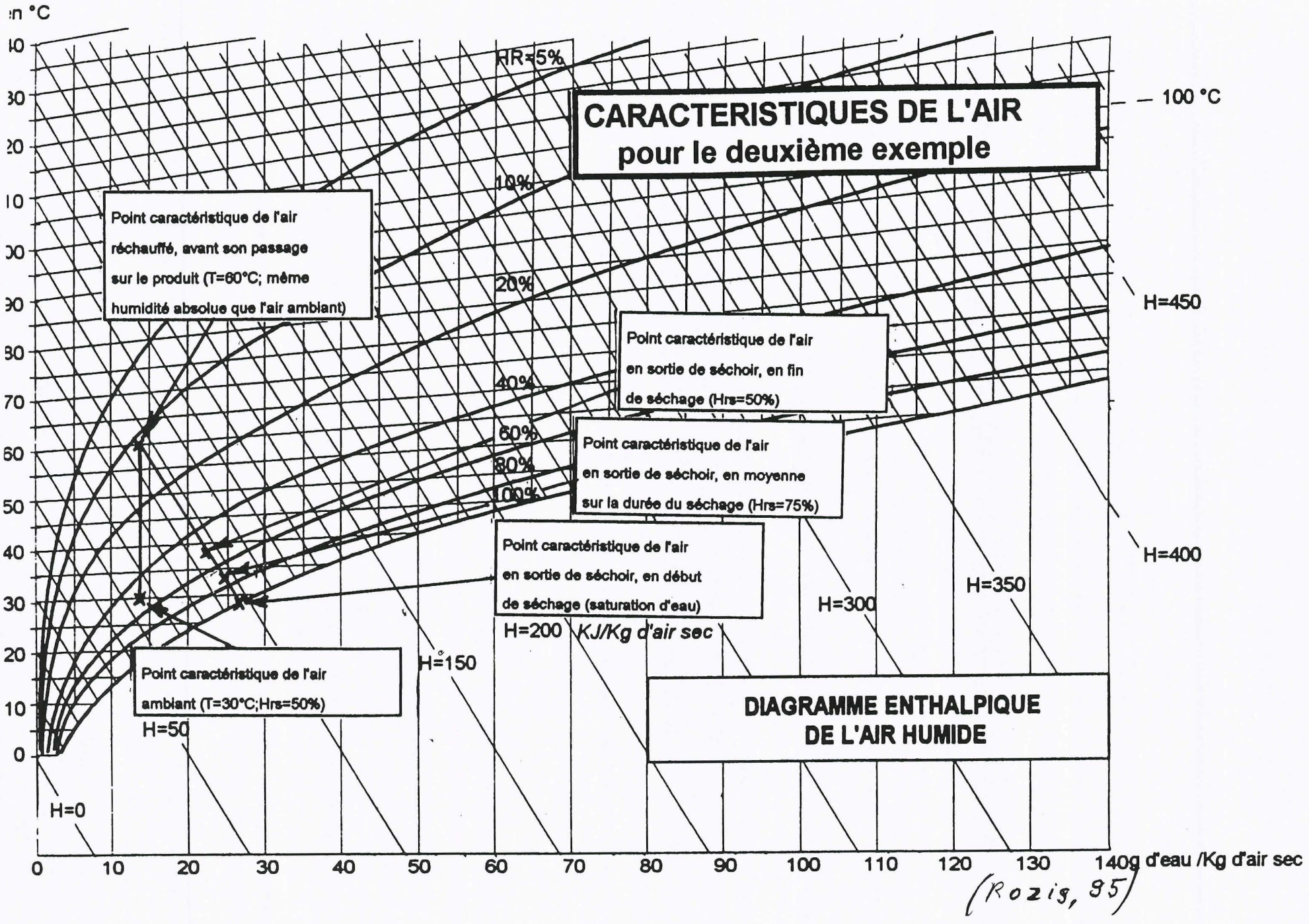
Annexe I : Vitesses maxi de flux d'air à travers une couche de fonio et perte de charge

Annexe II : Caractéristique de l'air (Rozis, 1995)

Annexe I : Vitesses maxi de flux d'air à travers une couche de fonio et perte de charge

Epaisseur de la couche de fonio cm	Vitesse d'air m/s	Perte de charge mm CE
Fonio décortiqué aux rouleaux		
1	0,13	13
3	0,19	32
6	0,20	57
Fonio brut		
1	0,21	8
3	0,18	21
6	0,17	37
Vitesse d'envolement du fonio	(en m/s)	
Fonio brut	3,01	
Fonio décortiqué aux rouleaux	3,41	

Tabl. I : Vitesses maxi de flux d'air à travers une couche de fonio et perte de charge


CARACTERISTIQUES DE L'AIR
pour le deuxième exemple
DIAGRAMME ENTHALPIQUE
DE L'AIR HUMIDE
Point caractéristique de l'air réchauffé, avant son passage sur le produit (T=60°C; même humidité absolue que l'air ambiant)
Point caractéristique de l'air en sortie de séchoir, en fin de séchage (Hrs=50%)
Point caractéristique de l'air en sortie de séchoir, en moyenne sur la durée du séchage (Hrs=75%)
Point caractéristique de l'air en sortie de séchoir, en début de séchage (saturation d'eau)
Point caractéristique de l'air ambiant (T=30°C;Hrs=50%)
HR=5%
10%
20%
40%
60%
80%
100%
100 °C
H=450
H=400
H=350
H=300
H=200 KJ/Kg d'air sec
H=150
H=50
H=0
en °C
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140g d'eau /Kg d'air sec
(Rozis, 95)

Résumé

Le séchage est une opération primordiale de la transformation du fonio, elle est fortement limitante au stade semi-industriel. Dans le cadre du projet Fonio, plusieurs séchoirs sont en tests dans les trois pays partenaires mais une réflexion sur les principes de séchage, menée sans attendre les résultats finaux de ces tests, permettra d'apporter une réponse rapide pour modifier des équipements ou de concevoir un séchoir original si les équipements existant ne se relevaient pas totalement opérationnels pour le séchage du fonio.

La réalisation d'isothermes de sorption définit la teneur en eau cible de pour le stockage du fonio paddy. Puis des tests préalables permettent de connaître les cinétiques de séchage enfin, deux principes de séchage sont testés. Le premier, un principe de séchage artificiel de séchoir à claies permutées, présente les avantages du séchage en couche épaisse, une bonne efficacité thermique. Le deuxième principe est celui du séchoir serre double ventilation, concept original améliorant le principe de séchage utilisé dans les séchoirs de type banco ou tente, avec une maîtrise de la ventilation de renouvellement d'air dans le séchoir et de brassage de l'air au-dessus des claies. A partir des principes validés, il sera possible de développer des équipements répondant aux attentes des transformateurs.

Mots clefs

Claies permutées | Fonio | Isothermes de sorption
Séchage artificiel | Séchage solaire | Double ventilation