

4655
**ARCHIV
BASSEY
74655**

IDRC-255f

Le séchage solaire en Afrique

Compte rendu du colloque
tenu à Dakar, Sénégal,
du 21 au 24 juillet 1986

Actes



Le Centre de recherches pour le développement international, société publique créée en 1970 par une loi du Parlement canadien, a pour mission d'appuyer des recherches visant à adapter la science et la technologie aux besoins des pays en voie de développement; il concentre son activité dans six secteurs : agriculture, alimentation et nutrition; information; santé; sciences sociales; génie et sciences de la terre; et communications. Le CRDI est financé entièrement par le Parlement canadien, mais c'est un Conseil des gouverneurs international qui en détermine l'orientation et les politiques. Établi à Ottawa (Canada), il a des bureaux régionaux en Afrique, en Asie, en Amérique latine et au Moyen-Orient.

74655

IDRC-255f

Le séchage solaire en Afrique

Compte rendu du colloque
tenu à Dakar, Sénégal,
du 21 au 24 juillet 1986

Rédacteurs : Michael W. Bassey et O.G. Schmidt



ARCHIV
BASSEY
no. 7 F

© Centre de recherches pour le développement international 1987
Adresse postale : C.P. 8500, Ottawa (Ontario) Canada K1G 3H9

Bassey, M.W.
Schmidt, O.G.

CRDI, Ottawa CA

IDRC-255f

Le séchage solaire en Afrique : compte rendu du colloque tenu à
Dakar, Sénégal, du 21 au 24 juillet 1986. CRDI, Ottawa, Ont., 1987.
ix + 306 p. : ill.

/Séchage/, /cultures agricoles/, /énergie solaire/, /recherche/,
/Afrique/ -- /aspects économiques/, /aspects sociaux/, /mise à
l'épreuve/, /besoins de recherche/, /rapports de réunion/, /listes de
participants/.

CDU : 631.362.621.47(6)

ISBN : 0-88936-491-5

Révision : Jean-Daniel Dupont et G.C.R. Croome

Édition microfiche offerte sur demande.

This publication is also available in English.

Les opinions émises dans cet ouvrage n'engagent que la responsabilité
des auteurs. La mention d'une marque déposée ne constitue pas une
sanction du produit; elle ne sert qu'à informer le lecteur.

RÉSUMÉ / ABSTRACT / RESUMEN

Résumé -- Voici le compte rendu d'un colloque sur le séchage solaire en Afrique auquel participaient 24 personnes effectuant des travaux de recherche propres à ce continent. Au nombre des communications, 17 décrivent les activités de recherche sur les aspects socio-économiques, la conception et l'essai des séchoirs solaires, ainsi que les besoins futurs de recherche. En outre, le lecteur trouvera un résumé des discussions sur l'état de la recherche sur le séchage solaire en Afrique, notamment les progrès réalisés et les activités de recherche coopératives nécessaires pour surmonter les problèmes techniques et socio-économiques qui entravent la mise au point et la diffusion de séchoirs solaires améliorés.

Abstract -- This book presents the proceedings of a workshop on solar drying in Africa attended by 24 participants involved with solar drying research relevant to the continent. Of the papers, 17 describe research activities on socioeconomic aspects, design and testing of solar dryers, and future research needs. In addition, a summary of the discussions held during the workshop to assess the state of the art of solar drying research in Africa are outlined, focusing on progress made and on possible research and collaborative activities that are needed to overcome the technical and socioeconomic problems that limit the development and introduction of improved solar dryers.

Resumen -- Este libro contiene los trabajos presentados en un seminario sobre secamiento solar en Africa, al cual asistieron 24 participantes del área de investigación en secamiento solar referida a este continente. Diez y siete de los trabajos versan sobre actividades de investigación en aspectos socioeconómicos, diseño y prueba de secadores solares y necesidades futuras de investigación. Se describe además la discusión sostenida durante el seminario para sopesar el estado de la investigación en secamiento solar en Africa, discusión que se centró en los progresos realizados y en las posibilidades de investigación y acciones colaborativas necesarias para superar los problemas técnicos y socioeconómicos que obstaculizan el desarrollo y la introducción de secadores solares mejorados.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	vii
Remerciements	ix
Introduction	1
Discussion et recommandations	7
Possibilités d'améliorations des séchoirs solaires traditionnels de récoltes au Cameroun : Recherche et développement Charles J. Minka	13
Influence de facteurs technologiques sur la vitesse de la déshydratation des légumes à l'aide de l'énergie thermique solaire Emmanuel Tchiengue et Ernest Kaptoum	26
Aperçu du séchage solaire du poisson en Gambie A.E. N'Jai	38
Circulation de l'air dans les séchoirs solaires à convection naturelle Herick Othieno	52
Recherche sur l'énergie solaire appliquée au séchage des récoltes au Kenya F.B. Sebbowa	65
Le séchage solaire au Mali Modibo Dicko	81
Possibilités et études de rendement des séchoirs solaires de récoltes à l'Île Maurice Y.K.L. Yu Wai Man	99
Conception et essais de séchoirs solaires pour aliments au Niger Yahaya Yaou, Zabeirou Radjikou et Jean-Marc Durand	115
L'énergie solaire utilisée pour le séchage des récoltes par des pays en développement E.A. Arinze	137
Conception, installation et essais préliminaires d'un séchoir solaire à convection naturelle de récoltes tropicales P.D. Fleming, O.V. Ekechukwu, B. Norton et S.D. Probert	157
Évaluation de trois types de séchoirs solaires de récoltes au Nigéria J.C. Igbeka	173
La technologie appropriée au séchage solaire du poisson dans les centres de pêche artisanale Niokhor Diouf	187
Le séchage solaire au Centre national de recherches agronomiques de Bambey : Synthèses des résultats de quelques essais Hyacinthe Modou Mbengue	207

Problèmes et solutions relatifs au séchage solaire des récoltes par convection naturelle Michael W. Bassey, Malcolm J.C.C. Whitfield et Edward Y. Koroma	221
Modèle numérique d'un séchoir solaire de céréales par convection naturelle : mise au point et validation P.H. Oosthuizen	250
Problèmes de séchage solaire au Togo K. Amouzou, M. Gnininvi et B. Kerim	268
Recherche et développement sur le séchage solaire : Les nouveaux choix en matière d'approvisionnement d'énergie ou la satisfaction des besoins perçus Charles Y. Wereko-Brobby	290
Annexe : Participants au colloque	305

PROBLÈMES DE SÉCHAGE SOLAIRE AU TOGO

K. Amouzou, M. Gnininvi et B. Kerim¹

Résumé — Les essais de séchage solaire réalisés au laboratoire sur l'énergie solaire de l'Université du Bénin sont présentés en liaison avec les modèles mis au point. Trois types de séchoirs, de capacité allant de 15 à 2 000 kg de chargement, sont décrits du point de vue de leurs dimensions, rendement physique et rendement économique particulièrement pour le séchage du maïs, une des principales productions du Togo. L'analyse économique montre que dans le cas d'une utilisation à plein temps, le séchoir solaire se compare favorablement au séchage industriel à l'aide de mazout ou du charbon de bois. Dans les conditions réelles d'utilisation des séchoirs dans nos pays, il apparaît que tous les systèmes mentionnés plus haut sont économiquement peu rentables, car les coûts de séchage se situent alors entre 19 % et 32 % de la valeur du maïs lors de la récolte. Le système à charbon de bois est le moins onéreux à exploiter et le système solaire est le plus onéreux en termes de coûts financiers et non de coûts économiques.

Introduction

Les terres arables au Togo sont de plus en plus exploitées en vue de réaliser une autonomie alimentaire. En 1980, 550 000 ha étaient cultivés, soit 22 % de la superficie agricole totale et, en 1985, 670 000 ha, soit 27 %.

Cette politique se traduit par un accroissement de la production des cultures vivrières : environ 250 000 tonnes de maïs, 150 000 tonnes de mil et de sorgho, 40 000 tonnes de riz sont récoltées chaque année. La production excédentaire est séchée selon des techniques traditionnelles simples, basées sur la seule absorption directe du rayonnement solaire incident, capté par les produits eux-mêmes.

Ces techniques traditionnelles, outre leurs intérêts certains, engendrent des pertes considérables et présentent des imperfections parmi lesquelles on peut citer : les phénomènes de photo-oxydation de certains nutriments, de destruction des vitamines en fin de séchage; le séchage assez lent entraînant le développement des moisissures surtout dans les régions humides et pluvieuses et le risque de réhumidification des produits, soit pendant la nuit par des condensations ou des rosées, soit par temps pluvieux.

1. Laboratoire sur l'énergie solaire, Université du Bénin, Lomé, Togo.

Pour améliorer l'efficacité du séchage, le Laboratoire sur l'énergie solaire de l'Université du Bénin (LESUB) a entrepris depuis 1980 la mise au point de séchoirs solaires simples.

Après avoir indiqué brièvement les conditions climatiques qui prévalent au moment des récoltes des céréales, nous examinerons dans cette communication le rendement physique des modèles de séchoir expérimentés, les résultats obtenus au cours des essais de séchage et les problèmes qui restent à résoudre à notre avis, en vue d'obtenir des produits séchés de meilleure qualité.

Données climatiques

Le Togo est caractérisé par une succession de climats du type subéquatorial avec quatre saisons au Sud, au type tropical avec deux saisons et une faible pluviosité au Nord. Ce climat subéquatorial, qui se présente généralement sur la côte ouest du golfe du Bénin, offre un régime solaire moyen au Togo. Les données météorologiques indiquent environ 2 090 heures d'ensoleillement annuel dans le Sud contre 2 660 heures dans le Nord. Les mois les plus ensoleillés vont d'octobre à avril avec en moyenne 7,2 heures par jour et 4,5 kWh/m²/j de rayonnement solaire global au sol. Les mois les moins ensoleillés sont juin, juillet, août et septembre avec en moyenne 5,5 heures par jour et 4,4 kWh/m²/j.

Les valeurs moyennes d'insolation et l'énergie au sol pour la période de 1980-1985 sont regroupées dans les tableaux 1 et 2 pour les trois emplacements qui représentent le Nord, le Centre et le Sud du pays (fig. 1). L'humidité relative de l'air ambiant est très élevée : 90 à 100 % la nuit (point de rosée 25°C), 50 à 60 % à midi par beau temps. Ces conditions climatiques sont très peu favorables au séchage traditionnel : la récolte des céréales, notamment le maïs, se fait pendant la saison des pluies, période la moins ensoleillée de l'année; les produits sèchent lentement, surtout dans le Sud du pays, et sont plus vulnérables aux infections et à la pourriture et la teneur hydrique atteint difficilement le niveau convenable au stockage. Donc, ces inconvénients pourraient être limités par l'utilisation de séchoirs solaires qui permettent un meilleur contrôle du séchage.

Modèles de séchoirs LESUB

Les séchoirs expérimentés ont été conçus sur le principe classique de "l'effet de serre", du type mixte. Les rayons solaires traversent la surface vitrée et réchauffent l'absorbeur peint en noir à l'intérieur du capteur. L'air de séchage, chauffé par la surface noire, circule par convection naturelle de bas en haut à travers le produit à sécher, se charge de la vapeur d'eau et s'échappe par les cheminées. Le produit est séché par l'action combinée des radiations solaires incidentes et l'air préchauffé dans un capteur de préchauffage.

Séchoirs en bois de type Brace, mixte

Le séchoir en bois de type Brace est portable et construit en bois et contre-plaqué (fig. 2). Il mesure 1,12 m de long, 1,30 m de

Tableau 1. Rayonnement global sur le sol horizontal
(moyenne mensuelle sur la période de 1980-1985).

Mois	G ^a	E ^b	Lomé		Atakpamé		Mango	
			M ^c	V% ^d	M	V%	M	V%
janvier	9,2	4,2	3,7	16	4,0	10	4,4	10
février	9,8	5,2	4,5	11	4,5	9	4,8	9
mars	10,0	5,5	4,8	13	4,6	15	4,9	15
avril	10,2	5,6	5,3	20	4,8	16	4,9	14
mai	10,0	5,5	4,8	29	4,7	18	4,7	19
juin	9,7	4,5	3,9	34	4,3	19	4,5	22
juillet	9,9	4,3	4,0	27	3,7	23	4,1	23
août	10,0	4,2	4,2	24	3,6	25	3,9	26
septembre	10,1	4,8	4,8	14	3,9	20	4,4	22
octobre	9,8	5,3	4,8	17	4,6	16	4,7	13
novembre	9,4	5,3	4,8	16	4,4	10	4,2	9
décembre	9,1	4,7	3,7	15	3,6	11	4,0	11
Moyenne (1980-1985)			4,4	20	4,3	16	4,5	16

^a G = valeur théoriquement du rayonnement hors atmosphère (exprimés en kWh/m²/j).

^b E = valeur estimée par B.W. Thompson (1970) sur la base d'un réseau de 10 stations pour tout le continent africain (exprimés en kWh/m²/j).

^c M = moyenne mensuelle sur la période de 1980-1985. Matériel Li-Cor cellule au silicium ± 5 % à 10 % (exprimés en kWh/m²/j).

^d V% = Pourcentage de l'écart type par rapport à la moyenne.

large et 0,67 m de hauteur. Son capteur a une superficie d'environ 1 m². L'absorbeur est en tôle galvanisée peinte en noir. Deux fentes grillagées permettent de régler le débit d'air à l'entrée du séchoir. La cabine de séchage a un volume de 0,13 m³ et permet de sécher 10 à 15 kg de produit en 3 jours. Deux cheminées de 1,5 m de hauteur chacune permettent l'évacuation de l'air chargé d'humidité. En 1980, il a coûté 30 000 F CFA.¹

Ce séchoir simple a longtemps servi pour sécher le malt au Centre de nutrition de Cacaveli à Lomé et les plantes médicinales à l'Antenne régionale de nutrition. Des essais de séchage ont porté aussi sur le poisson salé et du gombo. La déshydratation est progressive et efficace au bout de 4 jours (Gnininvi, 1981).

Le cadre en bois n'a pas résisté aux intempéries (pluie, vent), et le problème d'étanchéité s'est posé. La durée de vie a été de

1. Franc de la Communauté financière africaine.
220 F CFA = 1 \$ CA en 1986.

Tableau 2. Valeur moyenne de l'insolation et de l'énergie, 1980-1985 (Lomé).

Mois	Insolation	Énergie y (kWh/m ² /j) [y]	Corrélation (r)	Régression		Indice de clar b	
	X (h/j) [X]			y = aX + b ± σy/X a	y-F(X)		
janvier	6,7 (32)c	3,7 (19,1)	0,47	0,16	2,68	0,63	0,40
février	7,4 (24)	4,5 (14,6)	0,56	0,20	3,03	0,54	0,45
mars	7,0 (32)	4,8 (19,8)	0,79	0,33	2,50	0,58	0,48
avril	7,6 (37)	53,0 (23,0)	0,83	0,35	2,59	0,68	0,52
mai	6,5 (56)	4,8 (31,1)	0,77	0,32	2,78	0,96	0,48
juin	4,8 (69)	4,0 (35,8)	0,78	0,33	2,37	0,55	0,41
juillet	4,8 (65)	4,0 (30,1)	0,86	0,33	2,41	0,61	0,41
août	5,2 (56)	4,3 (30,4)	0,85	0,37	2,32	0,68	0,43
septembre	6,1 (46)	4,8 (25,5)	0,71	0,30	2,96	0,84	0,48
octobre	7,0 (42)	4,9 (24,2)	0,58	0,23	3,29	0,98	0,50
novembre	8,1 (23)	4,8 (18,2)	0,69	0,32	2,21	0,63	0,51
décembre	6,9 (29)	3,7 (19,6)	0,65	0,23	2,09	0,56	0,40

a Les variabilités sont données pour un intervalle de confiance de 69 % des cas ($\sigma y/x = \sigma y \sqrt{1-r^2}$).

b Énergie reçue au sol divisée par énergie théorique hors atmosphère (Duffie et Beckman, 1980).

c Les chiffres entre parenthèses représentent une variation (±) sous forme de pourcentage.

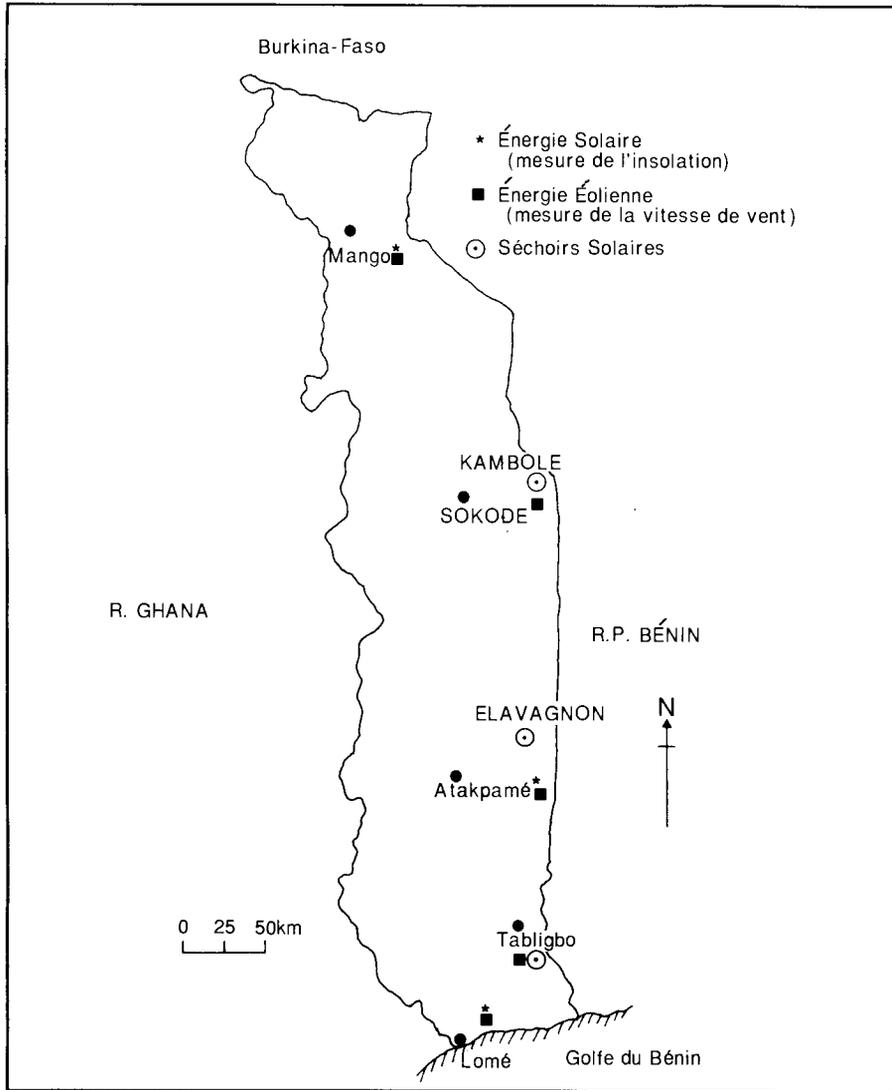


Fig. 1. Stations expérimentales au Togo.

4 ans. Ce premier modèle a surtout servi de prototype en vue de la mesure des paramètres physiques.

Séchoir en ciment de type mixte, polyvalent

Le séchoir en ciment de type mixte (fig. 3) a la même forme que le précédent mais du point de vue des matériaux de construction, le bois a été remplacé par des parpaings. Il mesure 4,82 m sur 2,82 m avec une capacité de chargement de 80 à 100 kg; il comporte les caractéristiques suivantes :

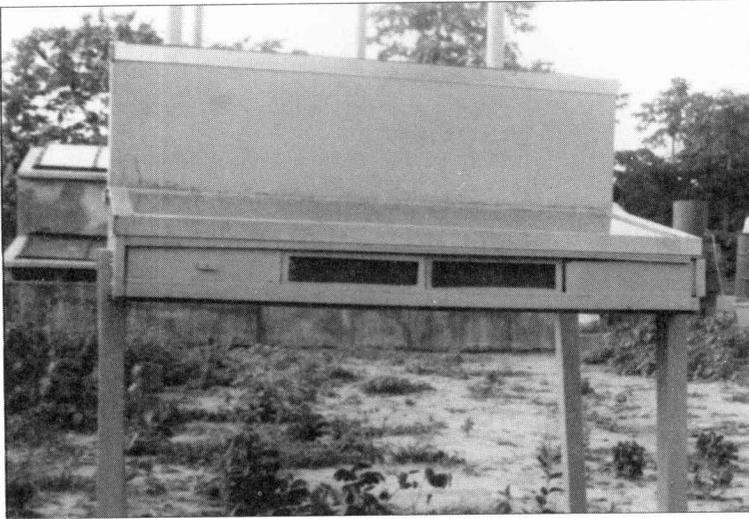


Fig. 2. Séchoir solaire en bois de type Brace (1980).

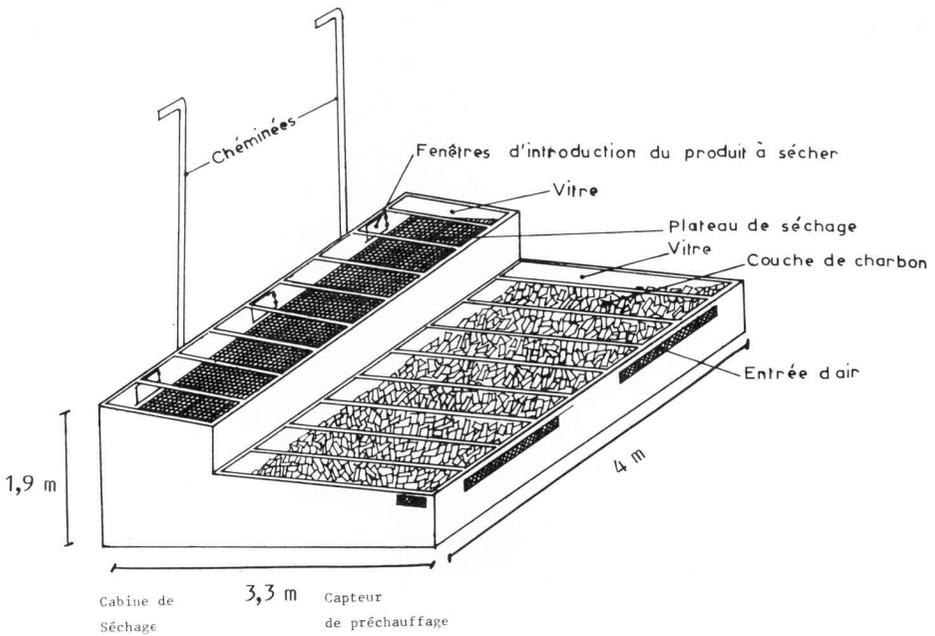


Fig. 3. Séchoir solaire en ciment d'une capacité de 80 à 100 kg (1981).

- Un capteur de préchauffage de l'air et une cabine de séchage recouverts chacun par 9 vitres de 1,33 m sur 0,48 m. Pour réduire le coût de l'absorbeur, la tôle noire a été remplacée par du charbon de bois, produit disponible en milieu rural. On espérait ainsi accroître la surface d'échange thermique qui compenserait la mauvaise qualité d'absorption et l'hygroscopie du charbon.
- Une couche de gravier placée au niveau d'entrée de l'air préchauffé permet d'assurer un stockage thermique ($2,4 \text{ m}^3$ sur une épaisseur de 40 cm).
- Deux fenêtres grillagées de 1,49 m sur 0,14 m chacune à l'entrée du capteur de préchauffage; elles font face à la direction privilégiée des vents (côté sud-ouest).
- Cinq plateaux de séchage en grillage fin couvrant une aire de séchage totale de 5 m^2 .
- Trois portes du côté nord pour introduire le produit à sécher; deux cheminées en tuyau PCV de 3 m hauteur et d'un diamètre de 20 cm.
- Angle d'inclinaison de tout le système : 15° (latitude du lieu : 6°N)
- Surface totale vitrée : $10,56 \text{ m}^2$.

Rendement physique

Les mesures du rendement physique de ce modèle de séchoir ont révélé qu'il est possible d'atteindre 65°C à midi par beau temps (700 à 800 W/m^2) dans la cabine de séchage contre 40°C à l'air libre (voir tableau 3). L'humidité relative de l'air se situe à près de 50 % à l'air libre et tombe à 30 % dans le séchoir.

À l'intérieur de la cabine, la vitesse moyenne de l'air varie de 0,15 m/s, à 8 h et à 20 h lorsque le vent extérieur est à 1 m/s, à 1,2 m/s à 12 heures dans la cabine contre 3,5 m/s à l'extérieur. Elle est quasiment nulle entre 20 h et 7 h à l'intérieur comme à l'extérieur (fig. 4).

Tableau 3. Variation de la température et de l'humidité relative en fonction du temps. Séchoir de type ciment mixte (80 kg).

Paramètres physiques	Séchoir	Air libre
Température moyenne ($^\circ \text{C}$)		
à 8 h	32	28
à 12 h	65	40
à 17 h	43	27
Humidité relative (%)		
à 12 h	30	45
à 17 h	41	55

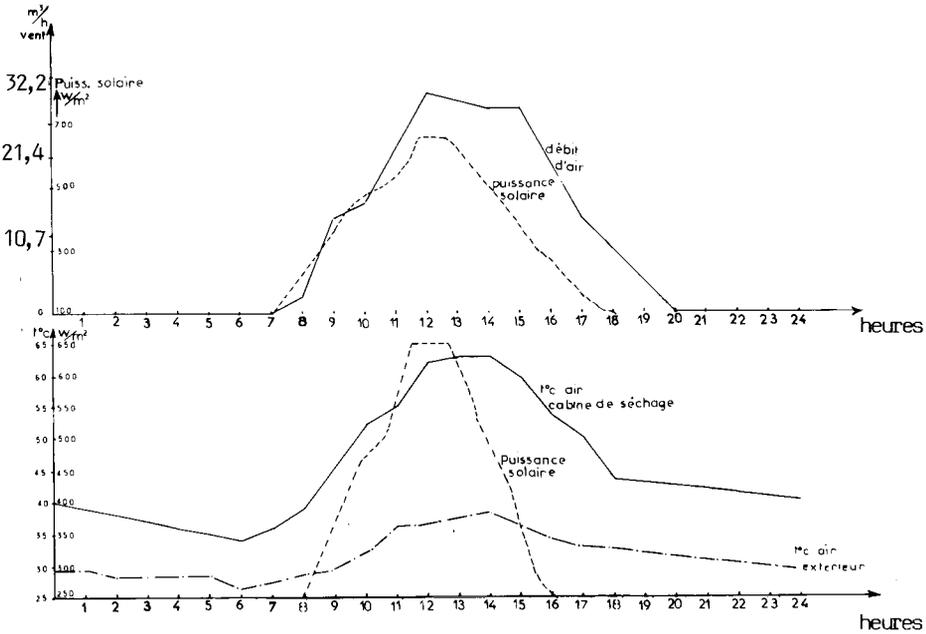


Fig. 4. Évolution du débit d'air, de la température dans la cabine de séchage et de la puissance solaire en fonction du temps (sècheir sans charge).

Le débit de l'air à l'intérieur de la cabine évolue donc graduellement de $2,6 \text{ m}^3/\text{h}$ le matin à $31,2 \text{ m}^3/\text{h}$ à midi pour revenir à $2,6 \text{ m}^3$ en fin d'après-midi.

Produits séchés

Les essais de séchage ont porté sur les cossettes de manioc dont la teneur hydrique initiale est de 60 %. À la fin de la première journée d'exposition, la déshydratation du produit a été plus importante dans le sècheir qu'à l'air libre (44,5 % contre 52 % à l'air libre) (fig. 5). Après 4 jours, le taux d'humidité résiduel du produit a atteint 9,9 % dans le sècheir contre 11,6 % à l'air libre. Une étude comparative de séchage de ces cossettes dans l'enceinte solaire et à l'air libre a fait l'objet d'une communication au Séminaire de Nairobi en novembre 1983 (Gnininvi, 1983).

Les essais ont porté aussi sur le maïs-grain (teneur hydrique initiale d'environ 20 % par rapport à la matière sèche) disposé en couche de 5 cm d'épaisseur. La dessiccation est progressive et au bout de 3 jours on a obtenu des graines à 12 % de teneur hydrique finale à l'intérieur de la cabine contre 15 % à l'air libre (tableau 4).

L'accès à l'aire de séchage par les petites portes est très peu pratique, surtout au cours des opérations de retournement manuel des produits. Lorsque des cossettes ont été étalées, on a vite observé par endroit la rouille du grillage métallique des plateaux.

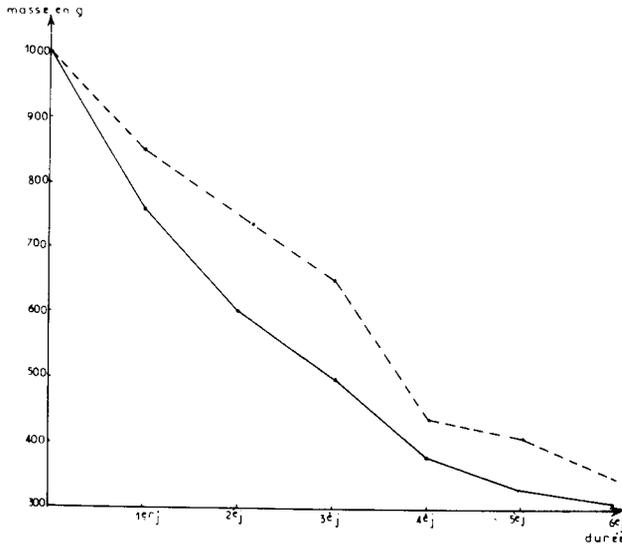


Fig. 5. Courbes de déshydratation du manioc. (Mesures prises à 17 h chaque jour : ----- air libre; — sècheur solaire.)

Tableau 4. Déshydratation du maïs-grain.

Temps de séchage	Teneur initiale	Jour					
		1	2	3	4	5	6
Teneur en eau du maïs (%)							
Dans le sècheur	20,3	16,1	13,2	12,0	11,8	13,1	12,2
À l'air libre	20,3	19,0	16,8	15,0	17,6	18,5	18,6
Humidité relative extérieure (%)							
		77	90	73	80	94	89

Quelles que soient les conditions atmosphériques, la température de la cabine de séchage ne dépasse guère 70°C, valeur conseillée pour obtenir un bon séchage du manioc ou du maïs (Séchage et stockage, 1974). Ce modèle de sècheur fonctionne depuis 1981 et aucun problème d'étanchéité au niveau du capteur, ni de détérioration des murs n'a été constaté. Son coût de revient total a été de l'ordre de 400 000 F CFA. Sa vulgarisation n'a pas été faite en milieu rural, car sa capacité de chargement est trop faible pour un usage collectif.

Sècheur de type ciment, mixte (fig. 6)

Le sècheur de type ciment (fig. 6) est un sècheur semi-industriel, d'une capacité de 2 000 kg de céréales, destiné à

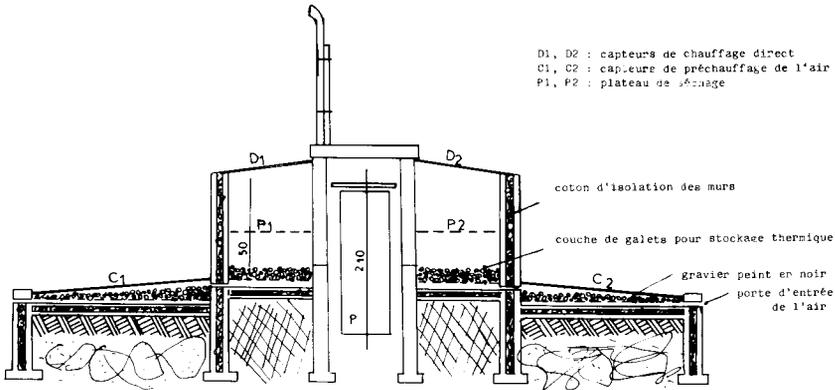


Fig. 6. Séchoir solaire -- 2 000 kg de céréales (maïs).

plusieurs producteurs regroupés en coopérative ou à des centres de collecte de céréales. Il est construit essentiellement avec des matériaux locaux. Quelques améliorations ont été apportées dans sa conception par rapport au prototype précédent :

- Comme absorbeur, le charbon de bois a été remplacé par du gravier peint en noir. Le gravier n'est pas hygroscopique comme le charbon, ce qui compense son inertie thermique plus grande. En outre, ce produit est disponible en milieu rural.
- L'aire des capteurs de préchauffage est doublée par rapport à celle des capteurs d'extraction afin de garder une température supérieure au milieu ambiant même la nuit. Il a en effet été observé que le capteur supérieur servait pour le séchage direct alors que les capteurs inférieurs étaient surtout utiles pour le stockage thermique.
- Une disposition symétrique a été adoptée pour l'architecture; un capteur de préchauffage fait face au Sud et l'autre au Nord. Ceci est possible du fait de la faible latitude qui va de 6° à 10° Nord. L'avantage est de réduire la surface de la paroi en contact avec l'air extérieur, et donc les pertes calorifiques. Cette disposition a en outre permis l'aménagement d'une allée centrale dans la cabine de séchage afin de faciliter le chargement des produits.
- La couche de gravier du capteur de préchauffage assurant l'absorption, et un stockage partiel de l'énergie, est surélevée par rapport au niveau d'entrée d'air, ce qui permet une meilleure répartition.
- Capacité : 2 000 à 2 500 kg de céréales (30 % de teneur en eau); aire de séchage : 32 m² de plateaux en aluminium; surface du capteur : 81 m²; deux portes permettent d'accéder à la cabine de séchage; le coût : environ 5 000 000 F CFA.

Rendement physique

Les températures maximales et minimales enregistrées pendant la saison des pluies sont de 60°C et 28°C à l'intérieur de la cabine de séchage contre 35°C et 22°C à l'air libre.

L'humidité relative de l'air dans le séchoir est toujours inférieure à 60 %, tandis qu'à l'air libre elle peut atteindre 100 % (fig. 7). Ces observations ont été faites sur le séchoir à vide.

Utilisation

Trois séchoirs de ce modèle ont été installés en zone rurale (fig. 1). Pour leur mise en oeuvre, des essais de séchage ont été

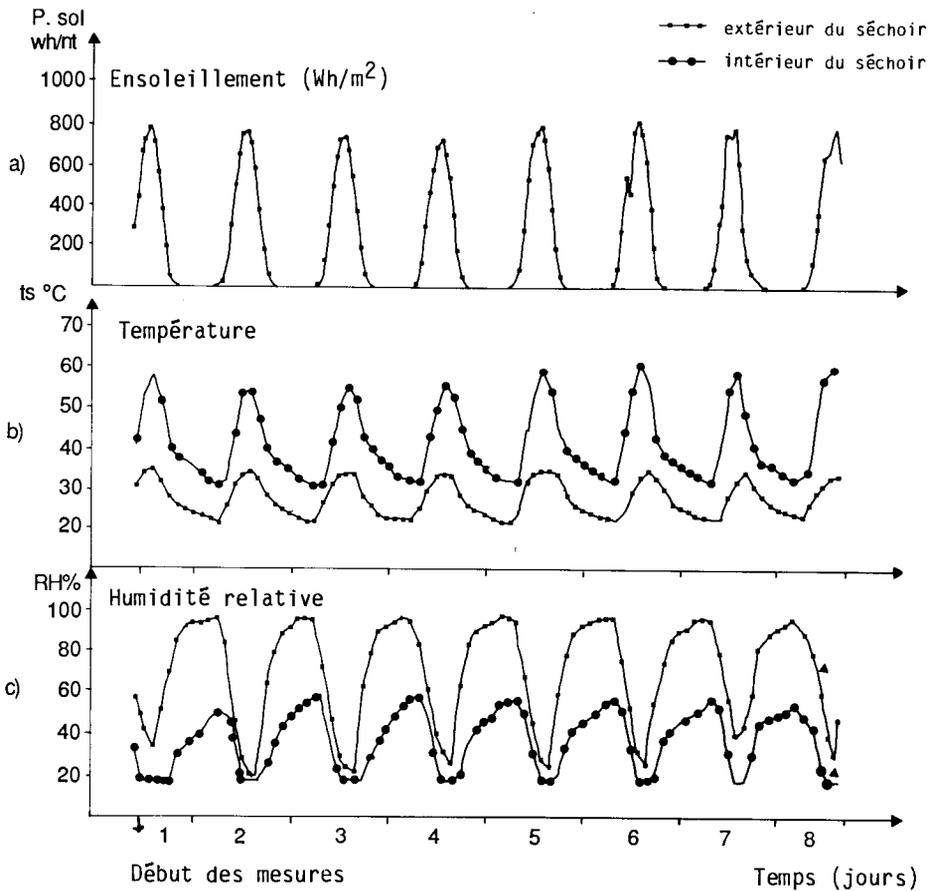


Fig. 7. Mesure du rendement physique (séchoir solaire sans charge d'une capacité de chargement de 2 000 kg).

effectués en présence des futurs utilisateurs. Ils ont porté sur le maïs commercial dont la teneur initiale en eau est de l'ordre de 20 % par rapport à la matière sèche. Le produit est étalé sur les plateaux de séchage sur une épaisseur de 5 à 8 cm. Des prélèvements sont effectués à la fin de chaque journée pour déterminer la perte d'eau. Dès le deuxième jour d'exposition, la teneur hydrique a commencé à osciller, signe que l'on approche la limite de séchage autorisé par les conditions d'équilibre de l'humidité environnante (fig. 8 et 9).

Les paramètres physiques enregistrés au cours de l'opération ont indiqué que le séchage est obtenu grâce à un écart maximum de température entre la cabine et l'air extérieur de 20 à 25°C et un minimum de 10°C (fig. 8a et b). Ces résultats ont fait l'objet d'une communication à la Conférence internationale sur la recherche et le

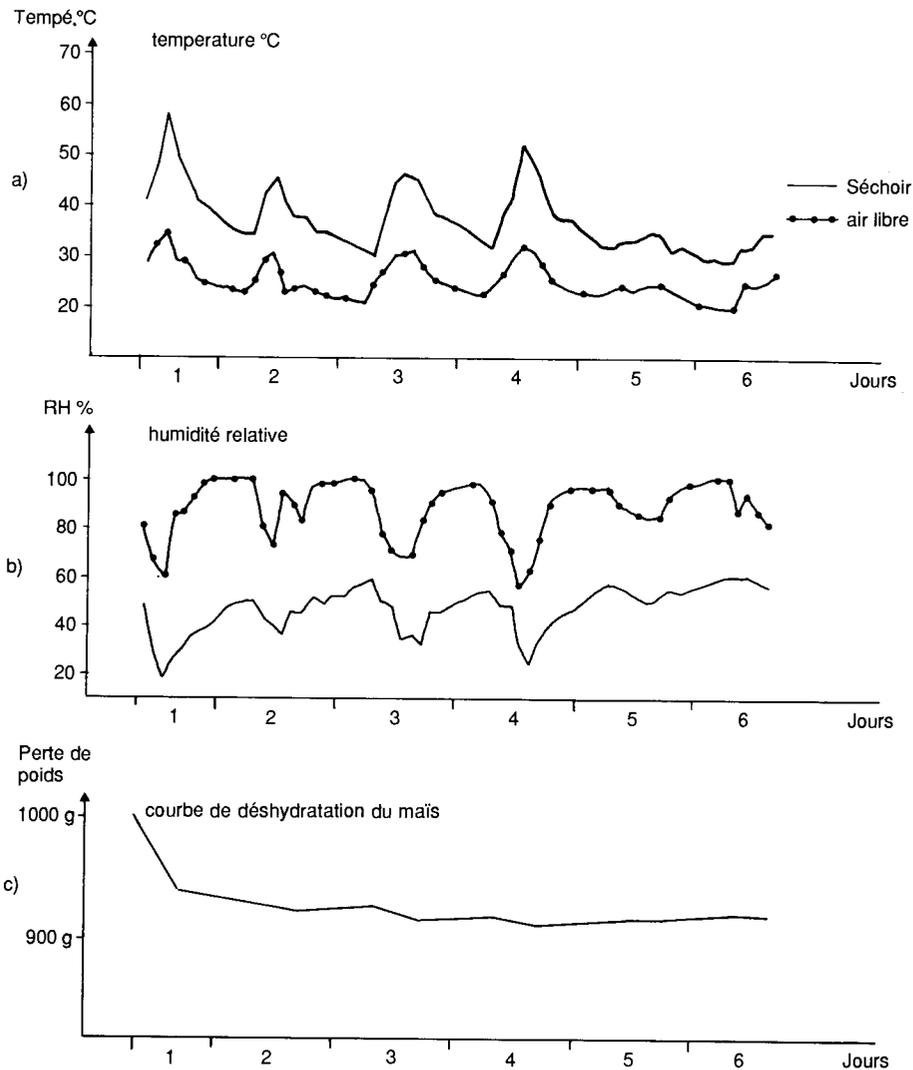


Fig. 8. Séchage du maïs-grain; séchoir solaire de Tabligbo.

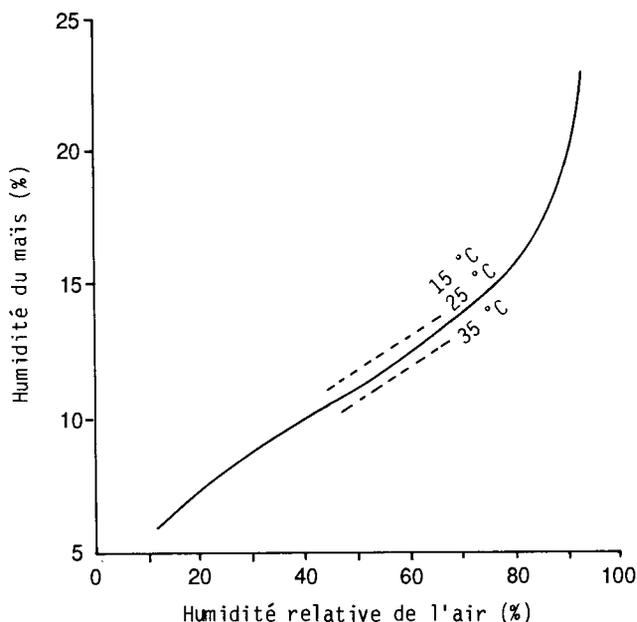


Fig. 9. Courbe d'équilibre d'humidité, Air-Maïs-Grains (établie à 25°C) (CEEMAT, 1974).

développement des technologies sur les énergies renouvelables en Afrique (Gnininvi et al., 1985).

Conclusions

Conçu pour fonctionner par convection naturelle, ce type de séchoir est destiné aux céréales présentant une faible teneur en eau initiale de 25 à 30 %. Il pourrait être utilisé pour sécher des cossettes de manioc ou d'igname, des légumes ou du poisson si un grillage plastique était substitué au grillage métallique de l'aire de séchage; il faudrait alors un chargement deux à trois fois moins important. Pour améliorer la convection, l'air ambiant pourrait être activé par un ventilateur adaptable au niveau des cheminées.

Ce séchoir, par son coût d'investissement de 5 000 000 F CFA, se situe dans l'éventail de ceux qui sont employés avec satisfaction dans certains pays comme le Brésil ou la Colombie.

Du point de vue entretien, des bris de verre ont été souvent observés soit par chutes d'objet sur les capteurs, soit probablement aussi à cause de contraintes mécaniques trop fortes imposées à ces vitres bon marché dites de "verre photographe".

Pour le suivi de l'opération, une campagne de démonstration et de sensibilisation est organisée chaque année par le laboratoire en

période de récolte. Ce séchoir a présenté un grand intérêt à Tabligbo (fig. 1), l'un des centres où les céréales sont collectées pour être livrées à Togograin (institution chargée d'acheter les excédents céréaliers au moment de la production, de les sécher, les stocker et les livrer sur le marché national).

Contraintes socio-économiques

L'emploi des séchoirs solaires simples pour assurer un meilleur contrôle du séchage ne peut être efficace que s'il est bien accepté par les utilisateurs. Force a été de constater qu'une fois laissées à la charge des bénéficiaires, malgré les recommandations, les installations sont souvent négligées : le vitrage est endommagé; l'entretien de routine (dépoussiérage des capteurs, nettoyage des alentours du séchoir) est irrégulier et la conscience du propriétaire est inexistante, les séchoirs ayant été installés gracieusement à titre expérimental pour l'instant.

Cette attitude serait liée au fait que le temps d'utilisation réelle du séchoir dans l'année ne dépasse guère 4 à 6 semaines. En dehors de la saison des récoltes, le problème de la responsabilité de l'entretien se pose, surtout au niveau des séchoirs destinés à des coopératives agricoles qui ont souvent elles-mêmes des difficultés de gestion et des conflits et sont donc instables ou éphémères.

Nous pensons que pour éveiller la conscience du propriétaire, il faudrait demander aux futurs utilisateurs, lors de la construction de séchoirs solaires en zone rurale, une participation matérielle ou physique.

Pour réduire les risques de bris, il faut remplacer les vitres par des matériaux plus résistants : des essais de recouvrement des capteurs avec des plastiques transparents stabilisés contre les rayons ultra-violets ou non, mais gardant assez longtemps une transparence supérieure à 85 % sont en cours.

Sur le plan économique, un séchoir de capacité de chargement 2 t de céréales (3 jours de séchage) permet de sécher 4 t en une semaine, soit 24 t au cours des 6 semaines de récoltes; sur 10 ans 240 t auraient donc été séchées. Les installations ont coûté 5 000 000 F CFA, une tonne de céréales séchée revient, sans actualisation des investissements, à 20 800 F CFA, ce qui est cher par rapport à la valeur marchande de ces produits, qui est de l'ordre de 50 à 100 000 F CFA la tonne.

Si le séchoir était utilisé toute l'année (52 semaines), la tonne reviendrait à 2 200, soit 10 fois moins cher¹, d'où la nécessité de mettre au point des séchoirs polyvalents, ou de les utiliser que pour sécher des produits à forte valeur d'usage : épices, plantes médicinales, denrées rares.

La lenteur des séchoirs solaires (2 à 4 jours de séchage) comparativement aux séchoirs au mazout (quelques heures) constitue un

1. Calcul comparatif des rendements et coûts d'un système solaire par rapport aux systèmes à mazout ou à charbon de bois présenté en annexe.

handicap sérieux à leur vulgarisation. Pour réduire la durée du séchage il faudrait :

- Améliorer le rendement des capteurs. On sait que la nature de la surface absorbante influe sensiblement sur le rendement, surtout si la température d'utilisation augmente ($>60^{\circ}\text{C}$) (Séchage solaire). L'utilisation des surfaces sélectives améliore le rendement des capteurs mais ne sont pas intéressantes lorsqu'on ne recherche pas des températures élevées. Le rendement peut être aussi amélioré au niveau des couvertures transparentes. Le verre étant trop fragile, il faut orienter les recherches vers la matière plastique surtout en milieu rural sans surveillance.
- Réduire les pertes thermiques par l'adaptation de l'architecture des installations, compte tenu de la latitude de la région.
- Améliorer le débit d'air. Pour obtenir un séchage rapide le débit d'air doit être assez élevé. Le Centre d'études et d'expérimentation du machinisme agricole et tropical (CNEEMAT, France) a déterminé les couples "température-débit d'air" à respecter pour sécher du maïs de 35 % à 15 % avec une hétérogénéité maximale de 3 % (tableau 5). La convection naturelle, souvent insuffisante, doit être aidée avec des ventilateurs.

Construction du séchoir

Les capteurs des séchoirs doivent être construits avec des matériaux fiables permettant de résister à la corrosion (facteur déterminant la durée de vie). Les joints fixant la couverture des capteurs devront être résistants pour assurer une assez bonne étanchéité extérieure. Les capteurs pourraient aussi être dotés de couvertures facilement démontables pour leur entretien.

À notre laboratoire, les recherches s'orientent vers des séchoirs solaires simples pour l'exploitant individuel : séchoir suffisamment grand pour sécher la production du champ d'un agriculteur. Nous pensons qu'il serait aussi possible d'utiliser des installations semi-permanentes (moins coûteuses) ressemblant à des serres basses avec un recouvrement de polyéthylène amovible permettant le séchage

Tableau 5. Couple "température-débit d'air" convenable pour sécher du maïs (teneur en eau 25 % à 13 %) (Séchage et stockage, 1974).

Température de l'air chaud ($^{\circ}\text{C}$)	Débit spécifique m^3 d'air/heure/ m^3 maïs
45	2 000
60	3 000-3 500
80	4 000-4 500
100	5 000-6 000

solaire naturel. Cette expérience menée dans certains pays comme le Sénégal et le Mali pourrait être étudiée dans les conditions climatiques togolaises. Une collaboration avec ces pays dans ce domaine serait appréciée.

Les produits séchés

Le produit à sécher n'est pas inerte. Sa nature physique et biochimique détermine des contraintes, des bornes à ne pas dépasser (Herbert et al., 1984). Les produits tropicaux sont souvent mal connus. Il est nécessaire de définir leurs caractéristiques lors du séchage (température, teneur hydrique etc.) (tableau 6) et en tenir compte au moment de la conception des séchoirs solaires polyvalents. On sait que pour obtenir un bon séchage, il faut que la tension superficielle de l'eau dans l'air ambiant. Au contact de l'air chaud, l'eau du produit diffuse de l'intérieur vers la périphérie. La vitesse de diffusion doit être prise en compte pour déterminer la vitesse de séchage de chaque produit afin d'éviter un "surséchage" de la périphérie pouvant entraîner : la formation de croûtes sur les graines; les phénomènes d'amylolyse pour les cossettes de manioc; la diminution du pouvoir germinatif des céréales et le brunissement non enzymatique (Wallace et al., 1973).

Avant le séchage du produit, certains prétraitements doivent être opérés : présentation du produit en quartier (banane), en cossettes (manioc, igname); blanchiment (inhibition des enzymes) pour éviter les phénomènes de brunissements enzymatiques et traitement préventif d'attaque de micro-organismes.

Tableau 6. Spécifications pour le séchage des produits agricoles (Herbert et al., 1984).

Produit	Humidité (teneur en eau %)		Température de séchage (°C)	Prétraitement
	initiale	finale		
Maïs	25	13	60-80	--
Haricot vert	70	5	75	blanchissement
Oignons, ails	80	4	55	découpage
Patate douce	75	7	75	découpage
Pomme de terre	75	13	70	découpage
Manioc	62	17	70	découpage
Légumes ^a	80	10	--	découpage
Petits pois	80	5	65	blanchissement
Banane	80	15	70	découpage
Café	51	11	--	fermentation
Fèves de cacao	--	9	--	--
Graines de coton	--	9	--	--
Coprah	30	5	--	découpage
Arachide	40	9	--	--

^a Feuillus (épinards, feuilles de manioc).

Pour éviter les phénomènes de photooxydation, de destruction des vitamines, il faut aussi définir les conditions limites (couples temps-température) supportables pour chaque produit.

Une fois les produits séchés, leur conservation durant le stockage pose aussi un problème épineux. Parallèlement aux essais de séchage, il faut effectuer des études de techniques de stockage dans les conditions climatiques de notre sous-région.

Au Togo, l'office chargé de la régularisation des céréales s'est heurté à des problèmes de conservation dans les silos. Les pertes enregistrées vont de 5 % à 100 % des produits stockés. Des recherches ont prouvé que les céréales apportées à Togograin pour y être stockées n'ont pas atteint les 13 % de teneur en eau. Les responsables de cette institution ont révélé qu'ils sont contraints d'améliorer le séchage en recourant à des séchoirs fonctionnant aux combustibles fossiles et à une convection forcée; le procédé est onéreux.

Au LESUB, un programme de travail vient d'être élaboré visant à utiliser l'énergie solaire pour améliorer le système de stockage du maïs à grande échelle.

La cause fondamentale de la mauvaise qualité des grains stockés dans les silos actuels nous semble être le degré hygrométrique élevé de l'air ambiant; du fait que la température ambiante est aussi élevée (point de rosée 25°C) il en résulte une tendance accélérée à la pourriture. Le principe de la solution que nous proposons est de maintenir dans les silos une température supérieure de 15°C par rapport à la température ambiante; ceci aura pour effet d'y réduire le taux d'humidité relative de l'air à une valeur inférieure à 70 %, valeur considérée comme seuil maximal pour une bonne conservation du maïs (Séchage et stockage, 1974 ; Tollier et al., 1973).

Conclusion

Bien que l'intérêt des séchoirs solaires soit reconnu sur le plan scientifique (Action, 1980 ; Ananivi, 1984), nous pensons qu'il faut avancer avec prudence :

- Les séchoirs déjà installés (fig. 1) doivent être suivis pendant 3 à 4 ans avant d'évaluer pleinement leur fonctionnement, leur rendement physique, leur rentabilité économique et leur durée de vie.
- La rentabilité des séchoirs individuels ou collectifs ne peut être certaine que dans la mesure où l'on peut programmer leur utilisation sur toute l'année.
- Pour promouvoir le séchage solaire par convection naturelle ou forcée, il faudra s'intéresser non seulement à l'ensoleillement et à l'insolation, mais aussi à l'humidité de l'air ambiant, à la vitesse du vent pendant les périodes de séchage; ceci permettra de bien connaître les caractéristiques du pouvoir séchant de l'air, nécessaires pour une conception spécifique des séchoirs.
- Pour augmenter la crédibilité des séchoirs solaires auprès des utilisateurs, il faut réduire le temps de séchage, augmenter le

volume des denrées à sécher et la résistance des installations aux intempéries (durée de vie).

- Des programmes de concertation (atelier ou symposium) devraient se multiplier pour permettre : une confrontation des modèles existants, et une initiation des chercheurs débutants. Ils devraient être faits en liaison avec des biochimistes et des spécialistes de génie alimentaire qui contribueront à définir les caractéristiques des produits lors du séchage.

Bibliographie

- Action/Peace Corp/UITA-Small Farm Grain Storage. Vol. III drying methods, Research report. Food and Feed Grains Institute, Manhattan Kansas 66 506. USA. July 1980.
- CEEMAT. Séchage et stockage. 1974. Manuel de conservation des produits agricoles tropicaux, Techniques rurales en Afrique, Centre d'étude et d'expérimentation du machinisme agricole et tropical. France.
- Commissariat à l'énergie solaire (COMES). Séchage solaire. Évolution des énergies renouvelables pour les pays en développement. Éditions SEMA. France.
- Djamesi, Ananivi. 1984. Développement de séchoirs solaires en Afrique de l'Ouest. Rapport, mission de consultant sur le développement des séchoirs alimentés par des sources d'énergies renouvelables. Projet N° CRAT/PRO/304.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. 1980. Solar Engineering of Thermal Press. John Wiley and Sons. New York, N.Y., É.-U.
- Gnininvi, Messan. 1981. Séchage solaire dans les projets de développement communautaire. Rapport N° 1, 2, 3 à l'USAID/Lomé 1979-1981. Laboratoire sur l'énergie solaire. Université du Bénin, Togo.
- Gnininvi, M., Kerim, B. 1983. Étude comparative du séchage des cossettes de manioc dans l'enceinte solaire et à l'air libre. Communication, séminaire de Nairobi/Rosta, novembre 1983.
- Gnininvi, M., Amouzou, K., Kerim, B. Field test of a two (2) tons maize solar drier. Communication, Conférence internationale sur la recherche et le développement des technologies sur les énergies renouvelables en Afrique. Île Maurice. Mars 1985.
- Herbert, J.P., Gaiffon, D., Themelin, A. 1984. Utilisation de l'énergie solaire pour le séchage de produits agricoles dans les pays en voie de développement. Communication, IV Séminaire sur l'énergie solaire. Trieste, Italie. Septembre 1984.

- Thompson, B.W. 1970. The Climate of Africa. Oxford University Press, Nairobi, Kenya.
- Tollier, M.T., Guilbot, A. 1973. Évolution de certains constituants du maïs en fonction de diverses conditions de séchage et stockage. Symposium international "Conservation des grains récoltés humides." mars 1973. Paris, France.
- Wallace, B., Michael, J., Morgan, A.I. 1973. Food Dehydration, drying methods and phenomena. Vol. I. The AVI Publishing Company, Inc., Westport, Connecticut.

Annexe : Comparaison des rendements et coûts des séchoirs solaires et des séchoirs à fuel et au charbon de bois

Rendement énergétique net

D'après les résultats du séchage des 2 000 kg de maïs dans le séchoir de Tabligbo, on peut observer que la limite physique du séchage est atteinte après 4 jours avec un rendement énergétique décroissant de 18 % le premier jour à 1 % le 4^e jour (tableau 7).

Dans une gestion industrielle, le séchage peut être interrompu dès que la teneur en eau est compatible avec l'humidité relative ambiante du milieu de stockage, soit 13 % de teneur en eau (TE). La période utile de ce séchage est donc terminée au bout du deuxième jour avec un rendement moyen net global de 15 % (tableau 7).

Comparaison des coûts

Sur la base d'une capacité nominale de séchage de 2 t en 2 jours, soit 1 t par jour, on suppose d'abord une utilisation idéale optimale, c'est-à-dire un fonctionnement ininterrompu pendant 15 ans. L'énergie primaire captée est ainsi :

$$\begin{array}{cccc} \text{Années} & \times & \text{jours/année} & \times & \text{kWh/m}^2 & \text{par jour} & \times & \text{m}^2 \\ 15 & & 365 & & 4,4 & & 81 & = 1,95 \text{ gWh} \end{array}$$

L'énergie utile est de 0,29 gWh si le rendement est de 15 %. Un système utilisant le fuel, avec un rendement de 60 %, consommerait 0,49 gWh, soit 41 tonnes de fuel.

Un système utilisant du charbon de bois, avec un rendement de 40 %, consommerait 0,73 gWh, soit 62 tonnes de charbon environ.

D'après le tableau 8, on voit que dans cette hypothèse théorique de fonctionnement ininterrompu, les séchoirs solaires se comparent favorablement aux autres types de séchoirs. Le surcoût reste inférieur au seuil tolérable de 5 % de la valeur du produit à la récolte.

Dans le cas réel où l'usage est intermittent, soit 14 % ou environ 51 jours d'utilisation par an, tous les systèmes étudiés ici se révèlent économiquement inacceptables pour les produits à faible valeur marchande tels que le maïs ou les céréales. Même dans ce cas,

Tableau 7. Période utile de séchage.

	Jour						
	0	1er	2e	3e	4e	5e	6e
Teneur en eau (%)	20,3	16,1	13,2	12,0	11,8	13,1	12,2
Eau évaporée (kg)		84	58	24	4	-26	18
Énergie utile (kWh)		63	44	18	3	-20	14
Rendement net (%)		18	12	5	1	-6	4

Q évaporation 635 k cal/kg eau = 2,7 MJ/KG = 0,75 kWh/kg 1 tep = 11,86 mWh. Rendement moyen sur les 2 premiers jours = 15 %.

le charbon de bois peut être préférable au fuel selon les contextes géographiques.

Notes afférentes au tableau 8

Bases de calcul

- Combustible : séchage solaire : rendement 15 % sur la période utile des 2 jours
 - : séchage au fuel : rendement 60 % ; 360 \$/tonne de fuel
 - : séchage au charbon de bois : rendement 40 % ; 114 \$/tonne de charbon
- Le séchoir solaire de référence a 81 m² de capteur.
- Équipement à renouveler : une fois sur les 15 ans pour fuel et charbon
 - : deux fois pour le séchoir solaire en bois
 - : réparation d'entretien pour le séchoir solaire en ciment
- Frais fixes : intérêt 10 %/an sur équipements et remplacements
- Main-d'oeuvre
 - 3 h/J x tonne pour séchoirs solaires
 - 5 h/J x tonne pour séchoir à fuel
 - 8 h/J x tonne pour séchoir à charbon de bois
- Pour l'équipement initial
 - : le séchoir solaire en bois est estimé à 0,8 \$/W utile
 - : le solaire en ciment 1,6 \$/W final
 - : le séchoir à fuel 0,5 \$/W final
 - : le séchoir à charbon 0,25 \$/W final

Tableau 8. Comparaison des systèmes de séchage solaire, fuel, charbon de bois.

Coûts (\$ US)	Solaire (rendement de 15 %)		Fuel (rendement de 60 %)	Charbon (rendement de 40 %)
	Bois	Ciment		
Équipement	7 000	14 000	7 500	5 500
Combustible	-	--	14 000 (1 960)	6 650 (931)
Frais fixes :				
intérêt	13 887	15 105	11 400	8 364
main-d'oeuvre	5 000 (700)	5 000 (700)	8 000 (1 120)	13 000 (1 820)
réparation ou rempla- cement	14 000	7 000	7 500	5 500
Total	39 887 (35 587)	41 105 (36 805)	48 400 (29 480)	39 014 (22 115)
Coût/tonne (\$/t)	7,3 (46)	7,5 (48)	8,8 (38)	7,1 (29)
% Val prod	4,8 (31)	5 (32)	5,8 (25)	4,7 (19)
Tonnes séchées sur 15 ans	5 500 (770)	5 500 (770)	5 500 (770)	5 500 (770)

Sont données entre parenthèses les valeurs dans le cas d'une utilisation pendant 14 % du temps au lieu de 100 % soit au total 4 600 heures.