

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

AVANT-PROPOS

Étant donné l'importance du séchage dans la chaîne alimentaire post-récolte, le Groupe des systèmes de post-production de la Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition du Centre de recherches pour le développement international (CRDI) a appuyé plusieurs projets dans ce domaine. Outre d'autres publications sur le séchage, le CRDI a publié Le séchage des produits alimentaires : compte rendu du colloque tenu à Edmonton, Alberta, du 6 au 9 juillet 1981 (IDRC-195f). Cette publication présentait en grande partie les conclusions des recherches techniques menées par des travailleurs en Afrique, en Amérique latine et en Asie sur des projets de séchage relativement importants faisant appel à diverses sources d'énergie pour la production de chaleur. Les systèmes de séchage étudiés convenaient, à bien des égards, aux besoins des moyennes et grandes exploitations agricoles en Amérique latine et en Asie.

Comme l'a fait remarquer Bruce Scott, directeur du Bureau régional du CRDI à Dakar, au cours de son allocution d'ouverture du présent colloque, la perte d'aliments après la récolte représente un gaspillage important de la production agricole actuelle. La mise au point d'une technique appropriée pour surmonter ce problème n'est pas étrangère au vaste éventail de problèmes de développement que connaît le continent africain. Les tentatives mises de l'avant pour accroître les méthodes de conservation ont révélé que certains facteurs comme les critères de séchage, l'acceptation par le consommateur, les produits à sécher et les sources de chaleur étaient particuliers à chaque endroit.

Les conditions économiques de l'Afrique dictent l'emploi de systèmes de séchage bon marché pour améliorer les méthodes traditionnelles. La gratuité et l'abondance de l'énergie solaire sur le continent expliquent les expériences actives menées par les chercheurs africains sur le séchage solaire. Cependant, malgré toutes les recherches effectuées, les séchoirs solaires n'ont pu être implantés efficacement pour toutes sortes de raisons techniques et socio-économiques, comme celles qui figurent dans les Proceedings of the Development on Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius, April 1985, publié par le Commonwealth Science Council de Londres, R.-U.

Vingt-quatre participants provenant de 11 pays d'Afrique, du Canada et du Royaume-Uni, qui ont pris part à des recherches sur le séchage solaire appliquées à l'Afrique, ont assisté au présent colloque, présenté des communications et participé aux échanges. Les discussions et les communications techniques au cours des diverses séances nous ont révélé qu'un effort concerté s'imposait pour que les chercheurs puissent concevoir un système de séchage amélioré en fonction des besoins de l'utilisateur potentiel. Il reste encore beaucoup à faire : évaluation des besoins de séchage, études en laboratoire sur l'amélioration des séchoirs et introduction des

séchoirs dans les régions rurales. De même, il est tout aussi important que les chercheurs africains échangent entre eux l'information qu'ils possèdent.

Ce document vise à informer le lecteur de l'ampleur des recherches effectuées en Afrique en lui signalant les obstacles qui empêchent d'atteindre des résultats pratiques et les solutions pour remédier aux problèmes. Nous espérons que notre document fera comprendre aux chercheurs dans les domaines du génie, de la physique, de l'économie, de la sociologie ainsi que de la technologie et de la science alimentaire le besoin d'une approche multidisciplinaire pour mettre au point des systèmes de séchage solaire appropriés.

En dernier lieu, nous désirons remercier tous les participants de leur contribution au colloque, et le Commonwealth Science Council, par l'intermédiaire de son Programme de l'énergie en Afrique, de sa collaboration soutenue avec les représentants de notre Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition.

Edward Weber

Directeur associé, Systèmes de post-production
Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition
Centre de recherches pour le développement international

REMERCIEMENTS

Nous désirons remercier chaleureusement tous les participants qui ont contribué au succès du colloque en présentant des communications, en prenant une part active aux échanges et en agissant à titre de président ou de rapporteur pendant les diverses séances.

Nous remercions également MM. Messan Gnininvi, Charles Wereko-Brobby, Gil Croome et Jean-Daniel Dupont qui, en tant que membres du comité de rédaction, nous ont aidés à revoir les communications de ce colloque.

Nous sommes vivement reconnaissants à M. Charles Wereko-Brobby d'avoir rédigé l'ébauche du sommaire des recommandations du colloque.

Nous ne saurions passer sous silence les efforts de MM. Gil Croome et Jean-Daniel Dupont qui ont vu à la présentation finale de toutes les communications techniques. Leur contribution a été vivement appréciée.

Le colloque n'aurait pas eu autant de succès sans les efforts inlassables de Mme Rose-Marie Erambert et Mlle Marie Élisabeth Turpin qui se sont occupées des activités préparatoires au colloque. Nous les remercions sincèrement de leur patience et tenons à souligner leur talent d'organisatrices.

Les échanges très techniques entre les participants francophones et anglophones ont pu être simplifiés grâce à l'excellent travail d'interprétation de Mme Joséphine Sarr et M. Momar Khary Diagne. Nous leur sommes redevables de leurs traductions précises et des longues heures qu'ils ont consacrées à leur travail.

INTRODUCTION

Il n'est pas nécessaire de justifier le besoin du séchage des diverses cultures alimentaires et monnayables sur tout le continent africain, les raisons étant bien connues : le séchage diminue la teneur en eau et, partant, le poids du produit; il prolonge la durée de conservation; il préserve la qualité nutritive des aliments; il réduit le risque de contamination par moisissure toxique, etc. Cependant, la méthode traditionnelle de séchage à l'air libre sur le sol présente diverses lacunes, par exemple l'infestation par les insectes, la contamination par les rongeurs et les oiseaux et enfin la réhumidification.

Le présent document traite du problème de la conservation des aliments en Afrique et des nouvelles techniques mises en place pour canaliser l'abondante énergie solaire vers le séchage des récoltes.

Nature du problème du séchage

On peut caractériser le problème du séchage, de façon particulière, à l'aide des facteurs suivants :

- Les grains de céréales et les légumineuses céréalières, qui sont des cultures relativement sèches, présentent, à la récolte, une teneur en eau d'environ 30 % qu'il faut faire descendre, par séchage, à 12 %. Par contre, les légumes verts à feuilles, les tomates, les fruits, le poisson et la viande ont une teneur en eau d'environ 60 % à 80 % qu'il faut ramener à une teneur de 10 % à 25 % après le séchage.
- Les conditions climatiques ambiantes, comme l'humidité relative (entre 30 % et 100 %), la quantité d'ensoleillement (entre 2 et 8 heures par jour), le rayonnement solaire disponible (entre 10 et 25 MJ/m²/jour), la fréquence et la durée des précipitations pendant la période de séchage, la poussière et le vent sont tous des facteurs qui influent sur les taux de séchage.
- L'agriculteur de subsistance a besoin de sécher une quantité relativement faible de denrées pour les besoins de sa famille (entre 1 et 2 tonnes de céréales ou de légumineuses céréalières, entre 5 et 50 kg de légumes verts à feuilles, entre 5 et 50 kg de fruits ou d'autres denrées périssables qui arrivent à maturité à peu près au même moment mais qui ne peuvent être tous consommés en même temps); l'agriculteur ou le pêcheur, dont la production excédentaire est destinée aux villes éloignées ou à la collecte sur place par des coopératives, doivent traiter des quantités encore plus grandes (500 à 1 000 kg de poisson frais, dans le cas du pêcheur).

Dans un contexte plus large, l'examen de la chaîne alimentaire nous amène à préciser exactement l'endroit où le séchage doit se

faire. Dans les pays qui ne possèdent aucun office de commercialisation, le séchage est susceptible de se produire à la ferme ou sur le bord de la mer, ou chez le courtier qui fait partie intégrante du réseau de distribution alimentaire; dans les pays qui sont dotés d'un bon système de collecte des produits nouvellement récoltés, le séchage principal peut être requis aux dépôts de collecte et dans les installations de stockage à long terme des offices nationaux de commercialisation; dans ce dernier cas, ce sont des milliers de tonnes, et non des kilogrammes, qui sont séchées chaque jour et les marchandises entreposées peuvent nécessiter un nouveau séchage à intervalles réguliers.

Étant donné que l'Afrique compte une population à 80 % rurale, les problèmes du séchage à la ferme familiale méritent l'attention des chercheurs et des spécialistes. De même, une bonne partie des poissons débarqués en Afrique sont pêchés par des artisans et passent entre les mains d'une foule de petites entreprises de conditionnement sur les lieux de l'arrivage, qui ne jouissent pas de l'électricité, d'un transport réfrigéré ou d'un matériel de fabrication de la glace.

Évolution du réseau de recherche

Afin d'améliorer les méthodes traditionnelles de séchage, plusieurs chercheurs africains travaillent depuis les 10 dernières années à mettre au point des séchoirs solaires pour diverses opérations de séchage. La plupart de ces projets ont été effectués en vase clos, les chercheurs n'étant très souvent pas au courant des activités complémentaires qui pouvaient avoir lieu dans le même pays.

C'est en nombre de plus en plus grand que les chercheurs africains abordent le problème du séchage des aliments. Orientés exclusivement à l'origine sur les séchoirs comme parties isolées d'un matériel, les chercheurs en sont venus à créer des équipes multidisciplinaires capables de préciser les caractéristiques du problème du séchage dans le contexte de la chaîne alimentaire.

En 1977, au cours d'une réunion parrainée conjointement par le Commonwealth Secretariat et le Commonwealth Science Council, des chercheurs africains ont isolé le séchage solaire des récoltes comme un thème important de la recherche. Depuis ce temps, une vaste gamme d'organismes internationaux financent des recherches dans ce domaine. Un réseau de chercheurs sur le séchage solaire des récoltes a été créé sous l'égide du Programme de l'énergie en Afrique et il a pu se réunir à des intervalles réguliers. C'est ainsi que ces chercheurs ont pu publier des études importantes à l'échelle nationale et internationale (on trouvera les références précises dans les communications du présent colloque).

La Conférence internationale sur les énergies nouvelles et renouvelables en Afrique (CSC 1985), tenue en avril 1985 témoigne de la qualité des travaux scientifiques accomplis à l'heure actuelle en Afrique. Il est utile de souligner qu'un pourcentage important des communications présentées à cette conférence traitait du séchage solaire des récoltes.

Le présent colloque

Bien qu'on ait observé un accroissement marqué des recherches sur le séchage solaire des récoltes, l'effort demeure modeste par comparaison à la complexité, à la diversité et à la taille du problème. Il n'est donc pas surprenant que la plupart des séchoirs solaires mis au point ne soient ni performants ni acceptés par leurs utilisateurs prévus. On explique principalement ce faible rendement par la discordance que l'on retrouve habituellement entre la température de travail et le débit de l'air circulant dans les séchoirs; la faible popularité chez les agriculteurs est habituellement liée au coût du système de séchage ainsi qu'aux obstacles sociaux dont on avait omis de tenir compte à l'étape de la conception.

Plusieurs limitations ont rendu le travail des chercheurs très difficile.

- Dans la plupart des applications rurales, les séchoirs solaires fonctionnent sans ventilateur, ce qui rend la circulation d'air insuffisante.
- Chaque produit comportant des caractéristiques particulières de séchage, il est souvent impossible d'utiliser un séchoir pour plusieurs cultures.
- Les utilisateurs potentiels n'ont habituellement pas les moyens de se payer un séchoir.
- Les ouvrages publiés n'abordent généralement que la construction et les résultats des essais et omettent souvent des données qui permettraient d'améliorer le séchoir ou de l'adapter à un autre emplacement ou à une autre culture.
- On manque habituellement de données de base sur le fonctionnement des séchoirs solaires à circulation d'air naturelle, tout comme de bonnes méthodes de conception.

Les observations des participants à la Conférence internationale sur l'énergie tenue à l'Île Maurice en 1985 ont confirmé l'urgence d'accroître les échanges entre les chercheurs ainsi que le besoin d'une meilleure définition de la stratégie et de l'orientation des travaux futurs en matière de séchage solaire.

Le présent colloque, organisé par le CRDI avec la collaboration du Commonwealth Science Council (CSC), qui a appuyé la participation de cinq chercheurs, visait à définir l'état des travaux sur le séchage solaire en Afrique et à préciser les secteurs où une recherche et une collaboration pratiques amélioreraient l'application de l'énergie solaire au séchage des récoltes. De façon plus particulière, le colloque visait à atteindre les buts suivants :

- examiner de façon critique les études effectuées sur le séchage solaire en Afrique;
- isoler les principaux obstacles techniques à la conception et à l'exploitation des séchoirs solaires de récoltes, et recommander des méthodes pour les surmonter;

- dans la mesure du possible, recommander des techniques viables de séchage;
- reconnaître les facteurs socio-économiques qui nuisent à l'introduction des séchoirs solaires en régions rurales et recommander des mesures correctives;
- établir les priorités futures de la recherche et du développement sur le séchage des récoltes (activités d'élaboration et de mise en oeuvre); et
- mettre en place un mécanisme pour accroître la collaboration entre les chercheurs dans le domaine du séchage des récoltes.

Le colloque s'est déroulé en deux étapes. En premier lieu, les auteurs ont présenté un bref exposé de leur communication et ont ensuite répondu aux questions des participants. (Ces communications constituent la dernière section du compte rendu.) En second lieu, les participants ont été en mesure d'identifier au cours de quatre tables rondes :

- les besoins de la recherche, les lacunes et les problèmes techniques;
- le cadre socio-économique dans lequel devraient s'effectuer les recherches à venir;
- les stratégies permettant de relier les efforts de recherche et les résultats à des programmes de mise en oeuvre et d'élaboration; et
- les occasions d'accroître la collaboration entre les scientifiques de manière à obtenir l'impact maximum des maigres ressources affectées à la recherche dans chaque pays.

Vue d'ensemble des communications

Le chapitre qui suit, intitulé "Discussion et recommandations", présente un cadre permettant de bien situer les principales questions et indique les recommandations particulières faites par les participants.

À quelques exceptions près, les communications se classent en deux grandes catégories : il y a d'abord les auteurs qui font état de la recherche axée principalement vers les utilisateurs et qui considèrent le séchoir comme le moyen possible d'accroître la qualité ou la durée de conservation d'un produit alimentaire. L'accent est mis sur les problèmes du séchage. Ainsi, les communications de Minka du Cameroun, de N'Jai de Gambie et de Diouf du Sénégal appartiennent à cette catégorie. Le second groupe d'auteurs aborde plutôt la configuration des séchoirs et présente des données de rendement généralement obtenues en laboratoire ou dans des stations de recherche : l'accent est mis sur les séchoirs. De façon générale, on constate que le chercheur de la première catégorie a souvent tendance à traiter les questions techniques de manière trop superficielle, d'où le manque de données, par exemple, en science de l'alimentation ou en génie. Par contre, le chercheur qui s'intéresse au matériel peut

presque sembler présenter des solutions à des problèmes qui n'existent pas. Il est intéressant de souligner que ces points forts respectifs de l'orientation de la recherche, ainsi que la combinaison logique des forces en vue de résoudre un problème global, n'ont pas reçu beaucoup d'attention lors des échanges sur les formes de la collaboration.

La communication de Basse et al. est particulièrement instructive et constitue un ajout fort apprécié dans la documentation. Les auteurs exposent en détail un processus complet de recherche à partir de l'identification d'un problème chez l'utilisateur, en passant par la mise au point d'une conception technique pour se terminer par la confirmation de la conception dans des essais sur le terrain. La communication précise de façon remarquable les lacunes que les auteurs ont décelées dans le processus global de recherche.

Un examen critique des études sur le séchage solaire nous amène à penser que certains des travaux ne reposent sur aucune analyse théorique. Ainsi, des chercheurs abandonnent une conception particulière à cause de données insuffisantes (et souvent décevantes) sur son rendement, en faveur d'une nouvelle conception, sans toutefois justifier par une analyse appropriée les raisons de cet abandon. De même, quelques chercheurs auraient apparemment modifié au hasard certains paramètres d'une conception sans se baser sur des fondements théoriques.

La convergence de la théorie, de la conception et de l'essai des prototypes représente donc une contribution importante au secteur de la recherche. Les auteurs semblent généralement d'avis que les faibles débits d'air constituent le critère limitatif des séchoirs solaires à convection naturelle. L'ajout d'un ventilateur mû par l'électricité ou par un moteur à essence est soit impossible dans bien des régions rurales à cause de l'absence d'électricité, soit d'un coût trop élevé lorsqu'il doit fonctionner à l'aide d'un moteur à essence ou diesel. La communication d'Oosthuizen décrit l'analyse théorique et les techniques de modélisation comme un apport prometteur à la recherche dans ce domaine. Ce thème fait d'ailleurs l'objet du chapitre qui suit.

C'est Wereko-Brobby qui pose à l'ingénieur la question fondamentale : êtes-vous certain de vous attaquer au véritable problème? Sa communication souligne le besoin de mettre en place des équipes de recherche multidisciplinaires pour que l'utilisateur puisse tirer des avantages réels, et fait ressortir la nécessité d'adopter et d'améliorer les méthodes socio-économiques. Elle met en évidence l'affirmation souvent répétée (et souvent négligée) qu'un nouveau matériel ou une nouvelle technique ne sauraient être adaptables sans d'abord présenter une cohérence technique, une acceptabilité sociale et une viabilité sur le plan économique.

Selon Amouzon et al., du Togo, l'un des principaux problèmes du séchage se situe dans les activités à grande échelle. Leur communication démontre que l'identification appropriée du problème de séchage dans la chaîne post-récolte contribue à orienter la portée et l'ampleur des études techniques.

Minka, du Cameroun, montre l'importance de définir le problème du séchage chez l'utilisateur et laisse croire que certaines questions,

comme l'élimination de la poussière et le fonctionnement indépendant du séchoir de manière à libérer l'exploitant pour d'autres tâches, pourraient avoir beaucoup plus d'importance que la diminution du temps de séchage lui-même. Son interprétation des résultats d'expériences amène l'ingénieur à reconnaître que certaines mesures concrètes comme l'efficacité du séchage pourraient devoir laisser la place à d'autres considérations dans certains contextes.

Dans une partie de leur communication, Bassey et al. soulignent l'importance d'accroître la capacité de séchage par le soleil sous des conditions d'ennuage en mettant en place un séchoir hybride; ils donnent d'ailleurs un exemple pratique de la façon d'utiliser des déchets agricoles dans un tel séchoir.

En dernier lieu, Sebbowa, du Kenya, soulève quelques questions importantes relatives au climat politique, lequel peut manifestement contribuer à augmenter ou à restreindre le nombre d'études fructueuses à des fins de développement.

La vaste gamme de produits mis en séchoir par les chercheurs devrait intéresser le lecteur. On y trouve des céréales, des légumes verts à feuilles, des produits de la viande, du poisson, du plantain bouilli et du pyrèthre. Le chapitre suivant montre qu'une meilleure compilation des caractéristiques du séchage soulève un intérêt commun.

De façon générale, les communications techniques illustrent le vaste éventail des activités de séchage solaire réalisées en Afrique tout en faisant ressortir les lacunes à corriger. La section "Discussion et recommandations" expose les domaines qu'il y aurait lieu d'approfondir.

Bibliographie

CSC (Commonwealth Science Council). 1985. Renewable energy developments in Africa: Proceedings of the International Conference on New and Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius (2 vol.), 25 mars au 1^{er} avril 1985. CSC, Londres, R.-U.

DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Cadre général

À l'instar de toutes les autres activités de recherche et de développement (R&D) axées sur des problèmes, la mise au point de séchoirs solaires pour les récoltes vise d'abord à exposer la bonne façon de concevoir et d'appliquer un procédé cohérent de résolution des problèmes qui assure à la fois une identification appropriée du problème ainsi que des solutions acceptables répondant aux besoins des clients. L'approche conceptuelle et les éléments essentiels d'un tel procédé pourraient prendre la forme indiquée à la figure 1.

Pour les chercheurs africains (ceux qui ont participé au colloque), on pourrait résumer comme suit les préoccupations et difficultés particulières qui se posent lorsqu'on tente de concevoir un procédé crédible de solution des problèmes :

- Quels grands problèmes (techniques et socio-économiques) reste-t-il à aborder et comment pourrait-on les définir?
- Comment les chercheurs pourraient-ils trouver les solutions appropriées?
- Comment pourrait-on faire connaître les solutions aux clients visés?

Ainsi, les trois secteurs négligés sont intégrés au sein du procédé de conception :

- Analyse de la situation : établir un cadre propice à l'identification des problèmes, évaluer les solutions techniques possibles et juger l'acceptabilité socio-économique des produits finals;
- Expérimentation : mettre au point, observer et mettre à l'essai le matériel technique, intégrer l'optimisation du rendement global en tenant compte des limites techniques et des caractéristiques des produits;
- Mise en oeuvre/diffusion : démontrer la durabilité et l'acceptabilité du produit final afin de répondre aux besoins des groupes cibles et fournir des débouchés aux entrepreneurs.

Pour le moment, la recherche appliquée s'attache en priorité à l'analyse de la situation et à l'expérimentation, bien qu'on doive reconnaître que le troisième outil a une importance tout aussi grande si l'on veut obtenir un produit final accepté par les utilisateurs de dernière ligne.

Pour cette raison, les sections qui suivent exposent les principaux problèmes identifiés lors du colloque ainsi que les mesures

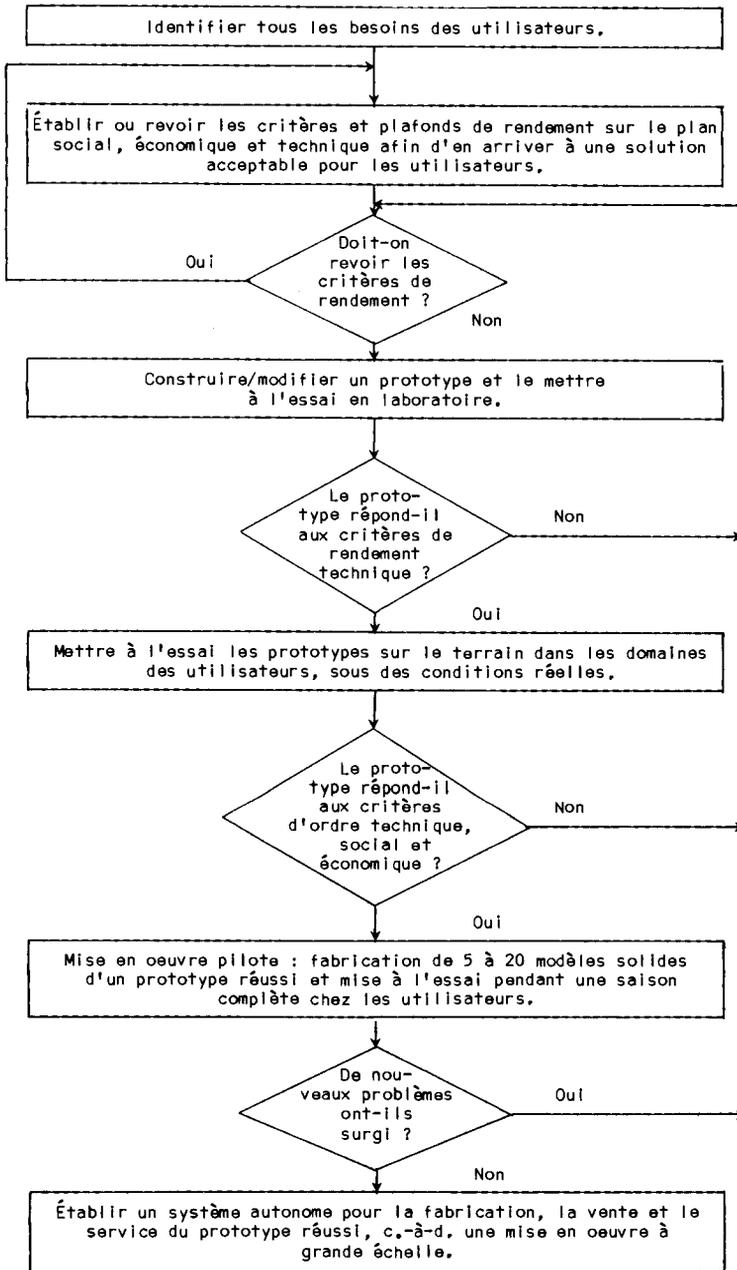


Fig. 1. Graphique de cheminement du procédé de recherche appliquée en vue de mettre au point une technique répondant aux besoins des utilisateurs.

futures recommandées, notamment la R&D ainsi que la collaboration qu'il faut mettre en place pour mener à bien les tâches d'expérimentation et d'analyse de la situation.

Principaux problèmes

Les grands secteurs problèmes qui suivent ont été classés dans quatre catégories :

1. Technique

- absence d'un procédé technique séquentiel de conception;
- insuffisance des procédés actuels d'essai et d'observation; et
- mise au point d'une méthode permettant d'évaluer et de comparer les produits finals (modèles de séchoirs).

2. Socio-économique

- omission d'intégrer le processus de mise au point d'une technique propre aux séchoirs solaires dans le contexte d'un problème global de séchage;
- omission de préciser les éléments particuliers du contexte socio-économique, notamment l'identification des problèmes des utilisateurs, l'établissement d'une base d'évaluation et l'élaboration de méthodes d'évaluation;
- omission d'établir la priorité relative du séchage dans le réseau national de production alimentaire (p. ex., les problèmes d'entreposage sont-ils plus importants que les problèmes de séchage?)

3. R&D et mise en oeuvre

Malgré plusieurs années d'expériences, il n'y a encore qu'un tout petit nombre de séchoirs en opération sur le terrain. Les chercheurs sont pour la plupart empêtrés dans l'organisation de base et dans l'optimisation des divers éléments et systèmes des séchoirs. Il faut jeter un pont entre la recherche en laboratoire et le besoin de résoudre des problèmes de développement réels et urgents.

On observe très peu d'échanges entre les chercheurs, les utilisateurs et les vulgarisateurs pendant l'étape de conception et de mise à l'essai des séchoirs. On se retrouve donc souvent avec des techniques inadéquates qui ne présentent qu'une utilité bien restreinte pour les consommateurs ultimes.

4. Collaboration

On reconnaît généralement que les chercheurs africains auraient avantage à collaborer tant dans les activités de recherche que dans l'échange de leurs expériences. Toutefois, des problèmes très concrets limitent une telle collaboration :

- ° un manque d'information sur les travaux actuels et antérieurs effectués en Afrique et ailleurs conduisent à une répétition des efforts et à l'isolement des chercheurs;
- ° un manque de collaboration entre les chercheurs des pays, tant à l'intérieur de chaque discipline qu'entre celles-ci, auquel il conviendrait de remédier afin de pouvoir traiter de problèmes particuliers; et
- ° le manque de contact entre les chercheurs de pays différents travaillant dans une même discipline ou dans des disciplines différentes se rapportant à leur propre sphère de compétence.

Cependant, le problème le plus urgent semble être le désintéressement évident des chercheurs à collaborer entre eux. Pour s'en convaincre, on n'a qu'à rappeler l'échec de ceux qui ont voulu établir et maintenir des revues et des sociétés savantes en Afrique en demandant un paiement rapide des abonnements, une contribution sous forme de communications techniques à des fins de publication et une aide aux fonctions d'organisation et de rédaction. Étant donné que le refus général de collaborer des chercheurs pourrait s'expliquer par la peur de perdre le contrôle de "leurs données", il y aurait lieu de mettre en place de toute urgence un système de publication des travaux individuels reconnus.

Recommandations

Voici les principales recommandations mises de l'avant pour chacun des quatre domaines d'action.

Recherche et développement

Questions techniques

Il convient de mettre au point un procédé de conception des séchoirs solaires de récoltes. Le procédé énumérerait chacune des étapes pour les praticiens et préciserait les tâches et exigences particulières de la méthode présentée à la figure 1. Compte tenu de la multitude de travaux d'expérimentation sur les séchoirs solaires, notre exercice se limiterait essentiellement à fournir des renseignements et à mettre à jour les références bibliographiques (p. ex., le guide du CSC pour 1985).

Il est nécessaire d'établir un programme rigoureux pour l'essai, l'observation et l'évaluation du rendement. Ce programme comprendrait, entre autres choses :

- ° la mise au point de meilleures techniques de modélisation;
- ° l'appariement de la modélisation à l'expérimentation sur le terrain;
- ° la mise au point d'instruments appropriés pour assurer une observation continue;
- ° l'établissement de critères de rendement pour les séchoirs

traditionnels, qui serviraient aux évaluations et comparaisons techniques;

- ° l'accroissement du débit de l'air dans les séchoirs par une meilleure conception des cheminées et l'intégration d'autres mécanismes.

On doit tenter d'établir les données repères sur les caractéristiques des principales cultures en Afrique. Elles devront comprendre des indicateurs physiques comme la température et la teneur en eau souhaitées, les relations physiologiques et microbiologiques et leurs répercussions sur les pertes post-récolte ainsi que sur la qualité nutritive des produits.

Il importe également de mettre au point des données sur les caractéristiques des divers produits après le séchage, surtout les critères nécessaires à l'entreposage, de manière à réduire au minimum toute perte supplémentaire et à préserver la valeur nutritive des produits.

Questions socio-économiques

Il importe de mettre au point des méthodes permettant de préciser les problèmes des utilisateurs et d'évaluer la rentabilité économique des divers modèles de séchoirs dans certains contextes socio-culturels. La méthode d'isolement des problèmes devra s'attacher à l'étape post-récolte et à l'identification des groupes d'utilisateurs cibles.

Les études post-récolte devraient porter sur la quantité des produits, les pertes et l'importance relative du séchage. Du même coup, l'identification des groupes d'utilisateurs devrait comprendre l'évaluation des appareils actuels de séchage, des types de produits, de la relation entre les marchés et les prix, de la répartition des revenus et des solutions de rechange aux séchoirs solaires.

La méthode d'évaluation économique devrait chercher à établir des techniques permettant de prévoir les effets particuliers de facteurs intangibles comme une santé et une qualité de vie améliorées sur la faisabilité techno-économique des séchoirs solaires. Il y a déjà des méthodes bien établies pour effectuer une évaluation économique de la rentabilité lorsqu'on traite avec des particuliers et des entreprises. Cependant, il y aurait lieu d'améliorer les données de certains indicateurs économiques importants, comme le taux d'actualisation et les prix fictifs, afin d'accroître la qualité de l'évaluation financière.

Collaboration

Pour susciter une collaboration réelle entre les chercheurs africains, on recommande l'application immédiate des mesures suivantes :

- ° Chaque chercheur devrait dresser une liste complète des membres de son équipe et des autres équipes de recherche avec lesquelles ils entretiennent des relations dans leur établissement (le cas échéant). Toutes ces listes seraient ensuite envoyées aux organisateurs du colloque qui se chargeraient de les colliger et de les diffuser au groupe.

- ° Partant de l'hypothèse que des crédits sont prévus pour la publication d'un journal concernant la R&D sur les énergies renouvelables en Afrique, on recommande que la Société de l'énergie solaire en Afrique établisse un conseil de rédaction dès que possible afin de lui confier la tâche de mettre au point une politique de rédaction et de publier le journal à titre de véhicule indépendant pour la diffusion des études importantes. À cette fin, il y aurait lieu d'appuyer les méthodes des chercheurs sur le séchage solaire en offrant les services de l'un des membres à titre de rédacteur technique en matière de systèmes de post-production.
- ° Il y aurait lieu de créer un comité pour explorer la faisabilité de publier un journal sur la R&D relativement aux tâches de post-production en Afrique. Une fois établies la viabilité et la faisabilité d'un tel journal, le comité devrait se donner pour but d'en publier le premier numéro d'ici 12 à 18 mois.
- ° Il faudrait encourager la collaboration soutenue d'organismes internationaux "donneurs", comme le CRDI et le CSC, avec les organismes de recherche dans chacun des pays d'Afrique.

POSSIBILITÉS D'AMÉLIORATIONS DES SÉCHOIRS SOLAIRES TRADITIONNELS DE RÉCOLTES AU CAMEROUN : RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

Charles J. Minka¹

Résumé — On a évalué les séchoirs solaires utilisés par les petits agriculteurs du Cameroun. Il s'agit de nattes de bambou surélevées sur poteaux, de dalles de ciment ainsi que de feuilles d'aluminium ondulées sur le sol. On a comparé le rendement de ces séchoirs traditionnels à celui de simples séchoirs solaires directs comme les marquises et les boîtes de séchage. On a mesuré le temps de séchage pour divers produits agricoles (cacao, maïs, arachides et plantain) et déterminé l'efficacité des différents séchoirs. Les essais en laboratoire et sur le terrain ont montré que les différents séchoirs traditionnels à l'air libre avaient à peu près la même efficacité et que la plupart des séchoirs solaires directs à convection naturelle ne réduisaient pas de façon importante le temps de séchage en comparaison avec le séchage à l'air libre. Toutefois, les séchoirs solaires trouvent leur utilité en protégeant de la poussière, de la pluie et des animaux. Après avoir exposé les problèmes de conception et de fonctionnement des séchoirs solaires agricoles, on fait des recommandations sur les activités futures de recherche et de développement ainsi que sur les méthodes pouvant accroître la collaboration entre les chercheurs du domaine.

Introduction

Le séchage constitue toujours l'une des principales méthodes de conservation des produits agricoles au Cameroun. Règle générale, les produits sont étalés directement sur le sol, sur une natte ou sur une dalle de ciment afin de les exposer au soleil.

On connaît bien les inconvénients liés à cette méthode traditionnelle. Le temps d'exposition est long et le séchage doit parfois être interrompu à cause de conditions climatiques défavorables. Une supervision constante du séchoir s'impose puisqu'il faut ramasser et déplacer les produits en cas de pluie, et chasser les prédateurs. En outre, la poussière, la saleté et les infestations par des insectes réduisent la qualité des produits.

Pour obtenir un entreposage prolongé du produit, il faut donc améliorer cette méthode de séchage. Cependant, lorsqu'on examine des séchoirs plus efficaces, il faut toujours tenir compte des conditions

1. Centre national d'études et d'expérimentation du machinisme agricole (CENEEMA), Département des énergies renouvelables, B.P. 1040, Yaoundé, Cameroun.

socio-économiques de l'utilisateur. Au Cameroun, 90 % des cultures alimentaires et monnayables sont produites par de petits agriculteurs qui se chargent également du séchage. Ces exploitants ne peuvent investir des sommes élevées dans un séchoir étant donné que le séchage ne représente qu'une partie de la chaîne de production-consommation. Enfin, si le séchage à l'air libre demeure si populaire chez les petits agriculteurs, c'est surtout à cause de son coût peu élevé : l'agriculteur construit lui-même le séchoir et l'énergie qu'il utilise est gratuite.

Il y a à l'heure actuelle deux institutions camerounaises qui effectuent des travaux sur le séchage solaire : l'École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé (ENSPY) et le Centre national d'études et d'expérimentation du machinisme agricole (CENEEMA).

À l'ENSPY, des chercheurs ont étudié la modélisation mathématique de capteurs solaires sur un séchoir solaire indirect à convection naturelle (Lefèvre, 1983). Le CENEEMA a concentré ses efforts sur la construction et la mise à l'essai de divers séchoirs solaires et ce sont ses travaux qui sont à la base du présent document.

Séchage des récoltes et conditions climatiques existantes

Les principales cultures séchées sont le cacao, le café, le tabac, l'arachide et le maïs dans la partie méridionale du Cameroun, et l'arachide et le sorgho dans la partie septentrionale.

Le séchage de ces récoltes se fait pendant les mois de juin et juillet et de novembre à janvier dans le Sud, et au cours des mois de novembre et décembre dans le Nord, la période de séchage coïncidant avec la saison sèche.

Les conditions climatiques sont plus favorables au séchage solaire dans le Nord que dans le Sud (tableau 1). Les essais en laboratoire et sur le terrain des séchoirs solaires qui sont présentés ici ont été faits dans le Sud.

Tableau 1. Conditions actuelles du séchage solaire des récoltes au Cameroun pendant les périodes sèches.

	Sud	Nord
Température (°C)	22-30	22-40
Humidité relative (%)	50-100	20-40
Rayonnement solaire moyen (kWh/m ² par jour)	3,8	5,5
Ensoleillement (heures par jour)	3-6	7-9

Expériences

Types de séchoirs

Étant donné que ce sont surtout de petits agriculteurs qui procèdent au séchage des récoltes au Cameroun, le CENEEMA, dont le mandat est de mettre au point des instruments agricoles adaptés aux conditions socio-économiques locales, s'est limité jusqu'ici à étudier des séchoirs solaires simples qui sont faciles à construire, à exploiter et à entretenir et d'un coût abordable pour l'agriculteur. Les trois types de séchoirs mis à l'essai étaient : les séchoirs traditionnels à l'air libre, les séchoirs de type marquise et les boîtes de séchage.

Les séchoirs traditionnels à l'air libre

Il s'agit simplement d'une surface de séchage appropriée que l'on expose au rayonnement solaire, par exemple, une natte de bambou étalée sur le sol ou sur des poteaux (fig. 1), une feuille d'aluminium ondulée, une dalle de ciment, ou tout simplement le sol lui-même.



Fig. 1. Séchage à l'air libre avec une natte de bambou surélevée sur poteaux.

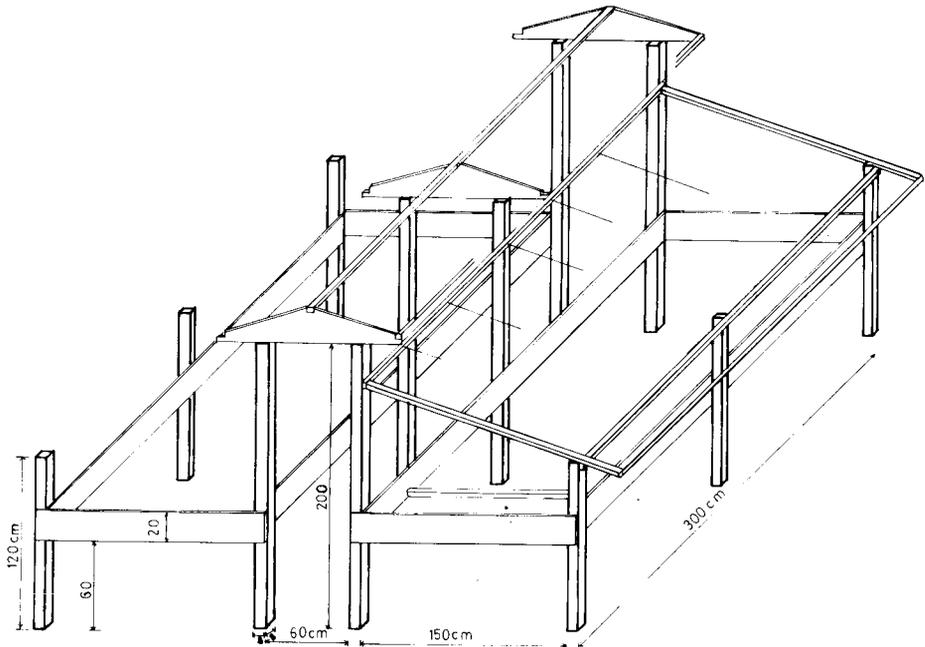


Fig. 2. Plan de séchoir de type marquise.

Les séchoirs de type marquise

Ce séchoir se compose d'une plate-forme de séchage recouverte d'une structure transparente qui laisse passer les rayons du soleil pour sécher les produits tout en repoussant la pluie, la poussière et les prédateurs. Le prototype mis à l'essai (fig. 2 et 3) comprend deux plates-formes parallèles de séchage, surélevées sur poteaux, séparées par un passage central aménagé pour l'exploitant. Les plates-formes et le passage central sont recouverts d'une pellicule transparente en plastique fixée à une ossature de bois à toiture inclinée. La surface de séchage peut être faite de moustiquaire métallique, de nattes de bambou ou de feuilles d'aluminium ondulées déposées sur des poutres de bois en travers de la plate-forme. La circulation de l'air se fait aux bords inférieurs et supérieurs du toit.

On procède actuellement à l'essai d'un autre prototype du séchoir de type marquise (fig. 3b). Ce séchoir comprend une plate-forme et, à l'arrière, des portes de contre-plaqué peintes en noir sur leur face intérieure.

Les boîtes de séchage

La boîte de séchage utilisée pour cet essai (fig. 4) est du genre mis au point par l'Institut de recherches Brace au Canada (Anon., 1965). Il s'agit essentiellement d'un caisson rectangulaire isolé à sa base et recouvert de vitre ou de plastique clair. Des trous dans la base permettent l'entrée d'air frais dans la boîte. L'air peut

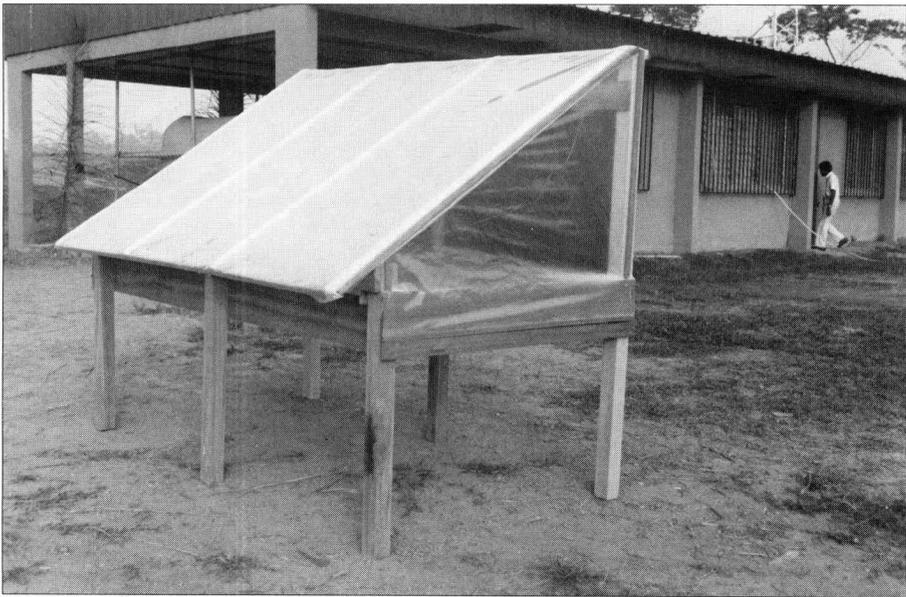


Fig. 3. Deux modèles de séchoir de type marquise.

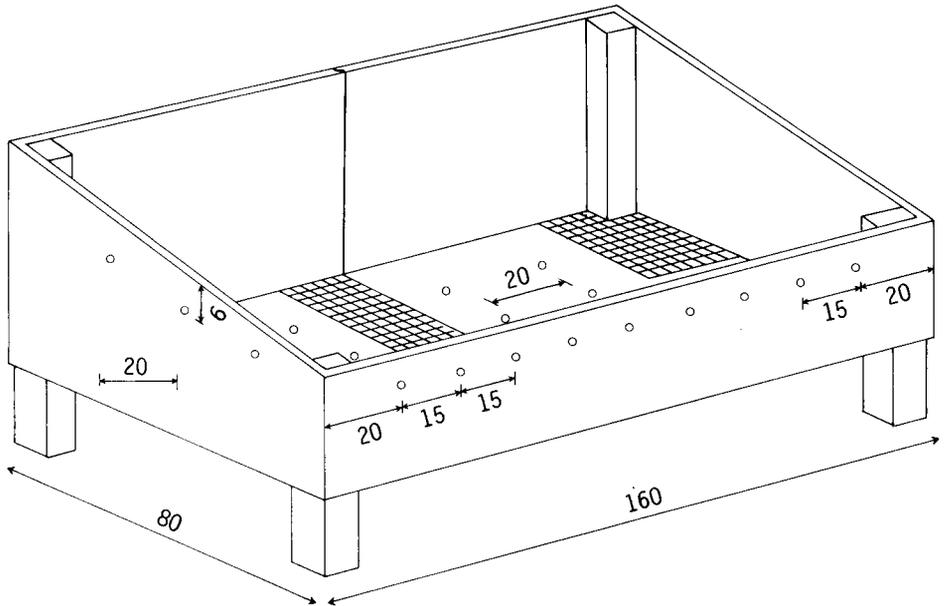


Fig. 4. Boîte de séchage solaire (dimensions en centimètres).

s'échapper grâce à d'autres trous situés dans les parties supérieures de la boîte et dans les panneaux arrière. La boîte en question a été construite en contre-plaqué de 19 mm d'épaisseur.

Procédé de conception

Les séchoirs à l'étude étaient de simples séchoirs directs à convection naturelle. La conception des prototypes n'a fait appel à aucune étude thermodynamique et à aucune technique informatisée de modélisation. Toutefois, on a tenu compte d'un certain nombre de facteurs techniques et socio-économiques : la nature du produit, la taille des tas à sécher, la disponibilité et le coût des matériaux de construction, le niveau de compétence nécessaire à la construction et à l'entretien du séchoir et enfin la facilité d'exploitation de l'appareil.

Ce procédé de conception ne nous permet pas de prédire le rendement du séchoir sous diverses conditions de fonctionnement.

Expériences en laboratoire

On a effectué cinq séries d'expériences sur des séchoirs traditionnels à l'air libre, des séchoirs traditionnels à l'air libre recouverts de plastique transparent, des séchoirs de type marquise et des boîtes de séchage.

Dans la première expérience, on a comparé trois genres de séchoirs traditionnels, soit une natte de bambou surélevée sur poteaux, une feuille d'aluminium ondulée déposée sur le sol et une

Tableau 2. Conditions ambiantes pendant les expériences en laboratoire.

	Expérience		
	1 et 2	3 et 4	5
Température (°C)	23-32	25-35	22-30
Humidité relative (%)	50-100	55-100	65-100
Rayonnement solaire moyen (kWh/m ² par jour)	3,5	4,1	3,8
Ensoleillement (heures par jour)	3-4	4-6	4-5

dalle de ciment. Le produit à sécher était du plantain bouilli que l'on a chargé dans le séchoir à raison de 17 kg/m² (61 %, à l'état humide). Le tableau 2 présente les conditions de l'expérience.

Dans la deuxième expérience, on a comparé le rendement des séchoirs recouverts d'un plastique transparent amovible. Ce plastique pourrait être utile en cas de précipitations soudaines. Les séchoirs étaient en tous points semblables à ceux de la première expérience, tout comme les conditions ambiantes.

Dans la troisième expérience, on a comparé le rendement d'un séchoir de type marquise, dont la surface de séchage était une moustiquaire métallique, à celui d'une natte de bambou exposée à l'air libre. Les produits à sécher étaient du cacao, des arachides et du maïs que l'on a chargés dans chaque séchoir à raison de 10 kg/m² de cacao sec (teneur en eau de 8 %, à l'état humide), 2 kg/m² d'arachides (teneur en eau de 10 %) et 4 kg/m² de maïs sec (teneur en eau de 10 %). Les conditions ont été un peu plus favorables qu'à la première expérience (tableau 2).

Au cours de la quatrième expérience, il fallait comparer trois types de surface de séchage dans un séchoir de type marquise : nattes de bambou, moustiquaire métallique et feuilles d'aluminium ondulées. On a séché du cacao, des arachides et du maïs, comme dans la troisième expérience. Les densités de chargement et les conditions étaient les mêmes qu'auparavant.

Dans la cinquième expérience, on a évalué le rendement d'un séchoir de type marquise, d'une boîte de séchage et d'un séchoir traditionnel à l'air libre. On a chargé les séchoirs de 15 kg/m² de tranches de plantain bouilli (teneur en eau de 61 %, à l'état humide), mais les conditions ont été un peu moins favorables qu'à la première expérience (tableau 2).

Tableau 3. Efficacité du séchage^a de plantain bouilli dans des séchoirs à l'air libre avec ou sans toit transparent.

Séchoir	Efficacité (%)	
	sans toit	avec toit
Natte de bambou	15,0	14,5
Dalle de ciment	14,0	15,0
Feuille d'aluminium ondulée	13,5	14,0

^a L'efficacité se définit comme : le rapport entre l'énergie utile nécessaire pour sécher le produit et une teneur en eau donnée)/(apport total d'énergie dans le séchoir).

Résultats

La première série d'expériences indique que les trois séchoirs à l'air libre avaient presque la même efficacité (tableau 3). Cela s'explique à cause de la nature différente des surfaces de séchage, qui servent uniquement à soutenir les produits sans influencer sur le processus de séchage, lequel repose principalement sur le rayonnement solaire incident. Ce n'est donc pas l'efficacité du séchage qui permet de choisir entre ces séchoirs, mais bien la disponibilité des matériaux servant à leur construction ainsi que leur durabilité et leur coût.

Même une fois recouverts avec un toit transparent, comme dans la deuxième expérience, les trois séchoirs à l'air libre ont la même efficacité de séchage (tableau 3) entre eux qu'avec les séchoirs sans couverture. Il semble que la couverture transparente ajoutée sur les séchoirs à l'air libre ne serve que de protection contre la pluie et les animaux; le taux de séchage ne s'accroît pas. En fait, la température de l'air à l'intérieur du séchoir couvert était supérieure à la température ambiante, tout comme son humidité relative, surtout au début du séchage.

Les taux de séchage du cacao, de l'arachide et du maïs pendant la troisième expérience ont été les mêmes qu'avec le séchoir de type marquise comportant une surface de séchage en moustiquaire métallique comme dans le séchoir à l'air libre (fig. 5). Cela n'est pas surprenant puisque le séchoir marquise est essentiellement un séchoir à l'air libre mais couvert. Toutefois, en modifiant la superficie de la claie de séchage du séchoir marquise, comme dans la quatrième expérience, on a constaté une fluctuation du taux de séchage selon la récolte (fig. 6). En effet, il semble que la feuille d'aluminium ondulée ne permette pas l'écoulement de l'eau hors du cacao, comme avec le bambou et les moustiquaires, ce qui ralentit le séchage. Cependant, les nattes de bambou ont une efficacité semblable à celle des moustiquaires, d'où la possibilité de les y substituer, vu le coût élevé de la moustiquaire au Cameroun.

Lorsqu'on a comparé le rendement d'une boîte de séchage à celui d'un séchoir marquise et d'un séchoir à l'air libre, dans la cinquième expérience, les tranches de plantain bouilli ont séché beaucoup plus vite dans la boîte de séchage (fig. 7). On y a observé des températures entre 20°C et 30°C supérieures à la température ambiante. La boîte de séchage devrait donc être utile pour sécher diverses denrées alimentaires.

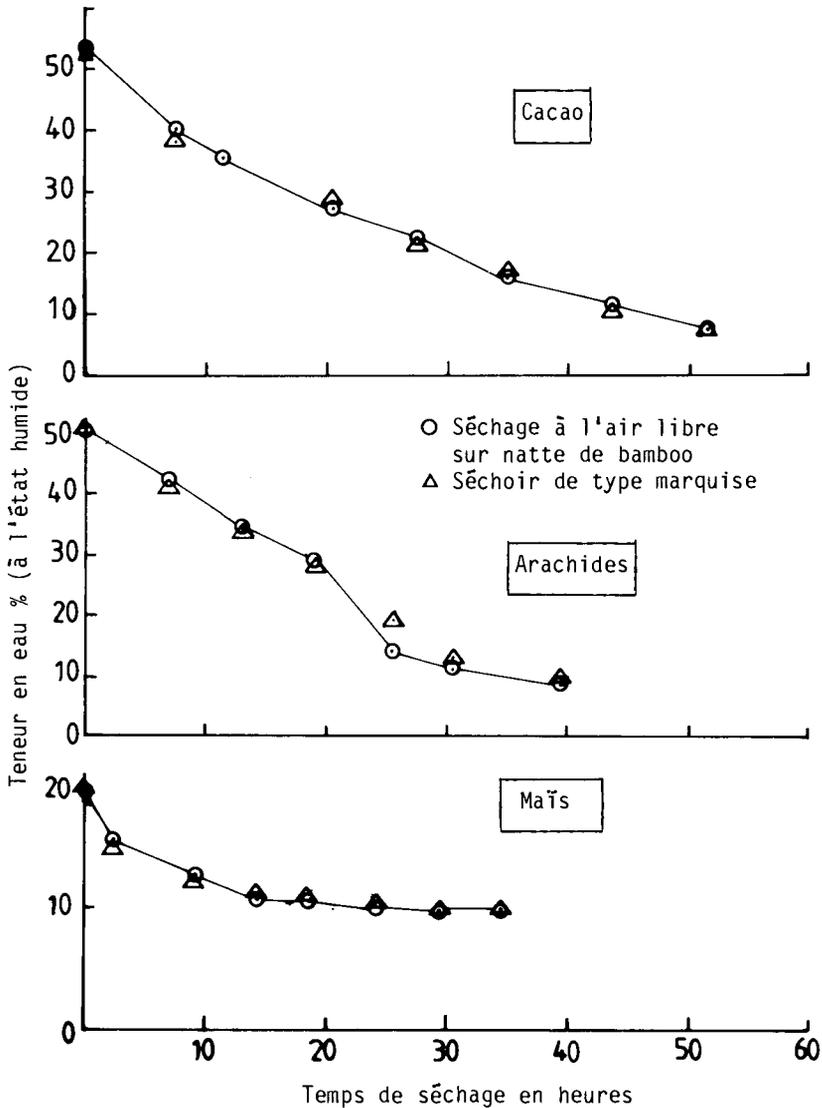


Fig. 5. Courbes comparées de séchage de trois produits avec deux systèmes de séchage différents.

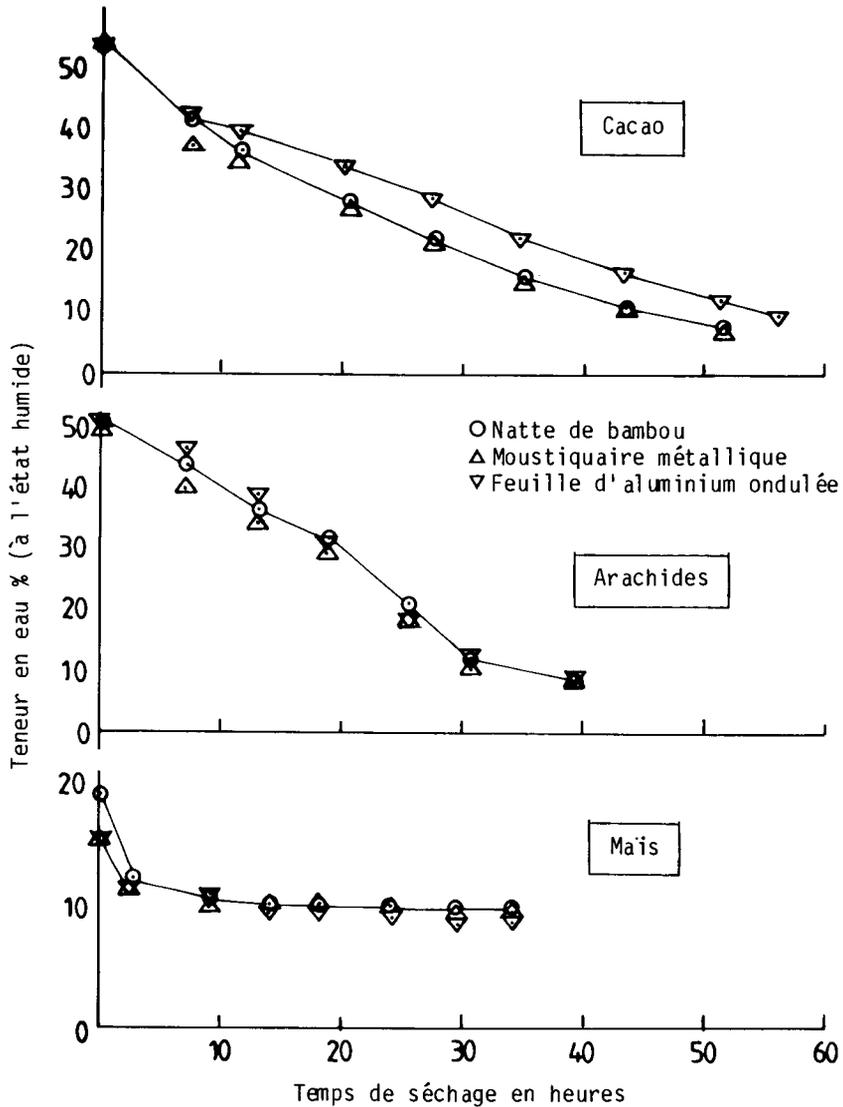


Fig. 6. Courbes comparées de séchage de trois produits sur différentes surfaces de séchage dans un séchoir de type marquise.

Essais sur le terrain

Des séchoirs de type marquise ayant les mêmes dimensions que les prototypes de laboratoire ont été installés sous diverses formes pour les essais sur le terrain. Les agriculteurs les ont utilisés pour sécher divers produits (cacao, arachides, farine de manioc, épices et herbes) pendant près d'un an. Les séchoirs ont été construits par des menuisiers locaux sous la supervision de techniciens du CENEEMA qui a également fourni les plans détaillés.

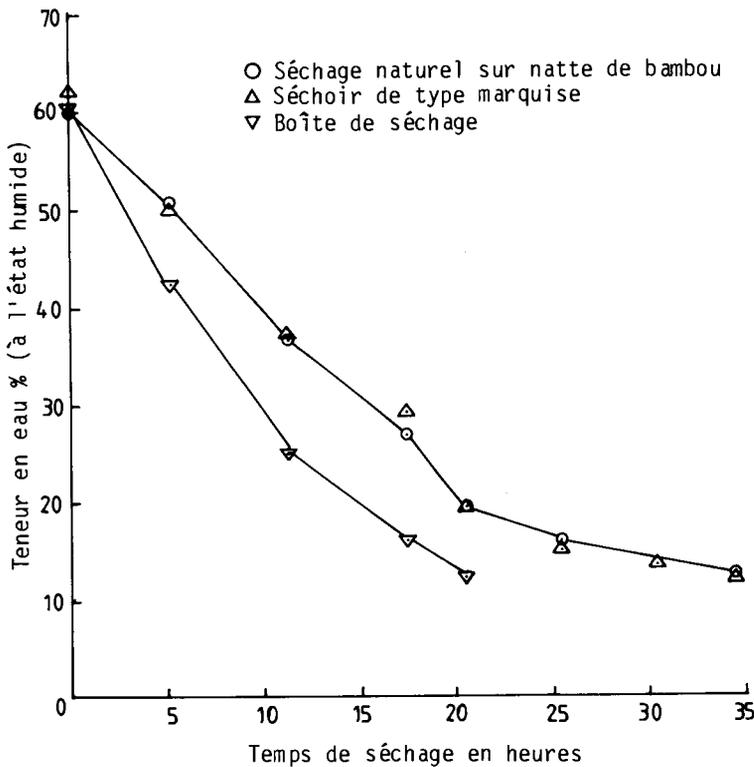


Fig. 7. Courbes comparées de séchage du plantain bouilli sur différents systèmes de séchage.

Les agriculteurs qui ont participé aux essais ont réagi favorablement. Lorsqu'on leur a demandé de comparer le séchoir marquise à leur méthode traditionnelle de séchage à l'air libre, certains agriculteurs ont signalé une période de séchage légèrement plus courte alors que d'autres ont observé une meilleure qualité du produit séché. Aucun n'a attaché une importance primordiale au temps de séchage : ce qui comptait, c'était la protection contre la pluie, la poussière et les animaux. Le seul inconvénient souvent mentionné était la fragilité du matériau en plastique utilisé pour recouvrir les séchoirs. Il s'agissait de pellicules d'emballage en polyéthylène, que l'on pouvait facilement acheter sur le marché, mais qui se détérioraient sous l'effet des rayons solaires et des vents violents après quatre ou six mois sur le séchoir.

On a également mis à l'essai deux boîtes de séchage. La première a servi à sécher des feuilles de ndolé et l'autre, de la farine d'igname. Avec les feuilles de ndolé, le temps de séchage a été écourté de 50 %. Pour la farine d'igname, le gain n'a cependant pas été aussi important puisque la pellicule transparente s'est embuée au cours des premières étapes du séchage. Pour surmonter le problème, il a fallu laisser ouvertes les portes du séchoir, ce qui en a réduit

l'efficacité. Il pourra se révéler nécessaire de déterminer la densité optimale de chargement de ce séchoir pour divers produits.

Problèmes de conception et d'exploitation

D'après notre expérience en laboratoire et sur le terrain, la conception et l'exploitation de séchoirs solaires en milieu rural souffre de quatre grands obstacles techniques :

- La nécessité de se limiter à la ventilation naturelle; il s'agit d'une restriction grave lorsqu'on désire obtenir des taux de séchage élevés.
- L'absence de connaissances sur les propriétés physiques et chimiques du produit à sécher. En outre, on ignorait souvent les caractéristiques exigées d'un produit final de bonne qualité ainsi que les conditions de séchage optimales.
- Le manque de données sur l'effet des divers paramètres des séchoirs sur leur rendement.
- L'absence d'un critère universel permettant d'évaluer le rendement des séchoirs solaires. Le chercheur en est réduit à comparer des séchoirs différents sous des conditions semblables. L'efficacité de séchage dépend d'un si grand nombre de facteurs non contrôlés qu'elle en perd presque toute sa signification.

Parmi les facteurs socio-économiques, le coût initial élevé des séchoirs solaires demeure le plus important. Dans le cas des petits agriculteurs, même un accroissement des gains financiers pourrait ne pas suffire à compenser ce coût.

Recommandations

Au moment de concevoir des séchoirs solaires pour le milieu rural, il faudrait toujours tenir compte des ressources financières limitées de la plupart des agriculteurs. On doit se souvenir que la diminution du temps de séchage n'est pas nécessairement le critère qu'ils recherchent. En effet, ce pourrait bien être l'amélioration de la qualité du produit séché et la diminution de la main-d'oeuvre engagée à l'opération. Par conséquent, il pourrait tout simplement suffire de leur fournir des séchoirs solaires directs, simples et faciles à construire avec des matériaux locaux. Les séchoirs solaires mis à l'essai au CENEEMA semblent prometteurs, bien que les essais sur le terrain aient fait clairement ressortir le besoin d'apporter d'autres améliorations. Ce n'est que dans le cas des grandes installations recevant une masse importante de produits à sécher que l'on devrait songer à utiliser des séchoirs solaires indirects à convection forcée. Les séchoirs indirects à convection naturelle atteignent rarement des taux de séchage élevés.

Les activités futures de recherche et de développement sur les séchoirs solaires au Cameroun devraient porter sur les points suivants :

- l'intensification des essais sur le terrain des séchoirs de type marquise ainsi que des boîtes de séchage et l'amélioration des séchoirs d'après les réactions des utilisateurs;
- la mise au point de séchoirs solaires directs équipés d'une source de chaleur auxiliaire;
- l'étude expérimentale de l'effet de divers paramètres de conception sur le rendement technique des séchoirs solaires directs; et
- la mise au point de procédés permettant d'évaluer le rendement technique des séchoirs solaires.

Bibliographie

- Anon. 1965. How to make a solar cabinet/dryer for agricultural produce. Brace Research Institute, Sainte-Anne-de-Bellevue (Québec), Canada. Do-it-Yourself Leaflet L6, 9 p.
- Lefèvre, A. 1983. Modélisation du capteur plan à air et application au séchage de produits agricoles. Institut national des sciences appliquées de Lyon, France. Thèse de Docteur-Ingénieur.

INFLUENCE DE FACTEURS TECHNOLOGIQUES SUR LA VITESSE DE LA DÉSHYDRATATION DES LÉGUMES À L'AIDE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE SOLAIRE

Emmanuel Tchiengue et Ernest Kaptoum¹

Résumé — Des légumes verts feuillus ont été préparés selon la méthode traditionnelle utilisée au Cameroun. De jeunes feuilles de *Amaranthus hybridus*, découpées ou entières, ont été lavées à l'eau, blanchies à l'eau bouillante pendant des périodes variables, essorées et mises à sécher en couches de densités variables et sous différentes conditions ambiantes.

La vitesse de séchage des légumes est largement fonction des procédés de préparation utilisés : temps de blanchissement, dimensions des particules et des agglomérats de particules, densité d'étalement des légumes sur les claies, heure de début de séchage, etc.

La vitesse de séchage est optimale lorsque les légumes ont été blanchis entiers de 7 à 10 minutes dans l'eau à 100°C et placés dans le séchoir solaire indirect dès 7 h du matin, étalés à la densité de 3 à 6,5 kg/m². Le temps de séchage, jusqu'à une teneur finale en eau de 10,5 à 12,0 %, varie de 4 à 10 h. La densité optimale de 3 kg/m² permet de réaliser le cycle de séchage en une journée lorsque les conditions atmosphériques sont favorables. Pour le site de Yaoundé, lorsque le temps de séchage est supérieur à 4 h, le temps réel nécessaire pour le séchage des produits passe alors de 4 à 28 h au moins, compte tenu de la durée quotidienne d'ensoleillement.

L'entreposage pendant 6 à 8 mois, sous emballage plastique et à la température ambiante, n'a entraîné aucune variation des qualités organoleptiques des légumes. Après la reconstitution, le produit obtenu garde sa coloration naturelle verte et les qualités des légumes frais. Aucun additif n'a été nécessaire.

Introduction

Le terme "Ndoïé" désigne au Cameroun à la fois certains légumes et les plats préparés selon des procédés traditionnels. Ces légumes verts feuillus sont, parmi les plus populaires, le Vernonia

1. Laboratoire de mécanique et énergétique de l'École nationale supérieure polytechnique, Université de YAOUNDE, Cameroun.

amygdalina, l'Amaranthus hybridus, le Manihot utilissima, l'Hibiscus cannabinus, etc.

La consommation des légumes atteint, dans certaines régions du pays, une moyenne quotidienne de 64 g par personne. En poids, cela représente 5,4 % des aliments consommés (Masseyeff, 1958). Pour les populations des zones rurales, les légumes constituent une excellente source de protéines ainsi que de vitamines et de sels minéraux. Les légumes, grâce à un excès de féculents (manioc, macabo, plantain, céréales), apportent aussi au régime alimentaire la part indispensable de ballast cellulosique qui, en quantité raisonnable, conditionne un fonctionnement régulier du transit intestinal. Les légumes permettent d'atténuer la sous-alimentation dont souffrent de vastes régions d'Afrique.

Les procédés de préparation des légumes, pratiqués traditionnellement depuis plusieurs siècles, n'ont cependant pas encore fait l'objet d'une tentative d'industrialisation. Peu de recherches ont été réalisées sur la technologie de transformation de ces légumes.

Compte tenu de leur caractère saisonnier, il apparaît indispensable de développer une technologie qui permette l'industrialisation de la fabrication de ces légumes, afin d'en rendre la consommation permanente et plus aisée.

Le séchage des légumes est généralement effectué au Cameroun dans les régions où les conditions atmosphériques le permettent, et surtout là où sévit une longue période sèche. Ces régions sont les Hauts Plateaux de l'Ouest, l'Adamaoua et le Nord du Pays (Tchiengue et Kaptououm, 1983).

Les feuilles à sécher sont en général détachées une à une, découpées, lavées, bouillies à l'eau avec ou sans adjonction de sel gemme, lavées de nouveau et mises à sécher sur des claies exposées aux rayons solaires ou suspendues au-dessus d'un feu de bois.

Certains auteurs se sont intéressés à la composition chimique des légumes ou des ndolés préparés (Masseyeff, 1958); Fournier, 1979). À notre connaissance aucune étude systématique visant à adapter ou à développer des procédés technologiques de fabrication de légumes séchés à l'aide de l'énergie thermique solaire en conditions tropicales à partir d'un matériel donné n'avait été entreprise.

La présente étude a pour objet de présenter les résultats de recherches menées sur l'influence des principaux facteurs technologiques sur la vitesse de séchage des légumes. La mise au point d'un produit modèle devrait faciliter la poursuite de cette étude, en particulier la recherche de procédés technologiques, fiables des points de vue industriel et économique et adaptés aux dimensions modestes des petites industries des pays africains.

Matériels et méthodes

Le séchage des produits agricoles est le processus technologique qui doit s'effectuer dans des conditions précises de température et d'hygrométrie de l'air. Cela est essentiel pour la bonne conservation des produits ainsi séchés. Au cours du processus de séchage, les

paramètres de l'air et les caractéristiques des produits varient suivant des lois qui peuvent être simples ou complexes.

La mesure de désorption du ndolé a nécessité la réalisation d'une cabine régulée en température et en hygrométrie (fig. 1). La mesure de la perte de masse du produit est obtenue à l'aide d'une balance enregistreuse. Pour une température et une hygrométrie déterminées, la courbe de perte de masse du produit a été enregistrée en fonction du temps. Les résultats théoriques étant en très bon accord avec les résultats expérimentaux, nous sommes passés à l'expérimentation dans un séchoir solaire (fig. 2, 3 et 4).

Voici la fiche technique du grenier du séchoir expérimental présenté à la figure 3.

- Dimensions intérieures : largeur 970 mm, profondeur 750 mm, hauteur 600 mm.
- Dimensions extérieures : largeur 1 040 mm, profondeur 940 mm, hauteur 600 mm.
- Volume utile : 0,436 m³.
- Dimensions des claies : 970 x 750 mm.
- Nombre de claies : 4.
- Surface de séchage : 2,9 m².
- Rapport surface/volume : 6,64 m⁻¹.
- Matériaux : contre-plaqué et lattes.
- Chargement : porte à deux battants située à l'arrière.
- Face avant vitrée.

La température et l'hygrométrie de l'air

Du 15 novembre 1985 au 15 mars 1986, la température ambiante et l'hygrométrie de l'air étaient très favorables au séchage de produits végétaux. (La figure 4 donne un exemple de ces conditions pour une semaine, du 26 novembre au 2 décembre 1985.) La température varie de 22 à 24°C entre 20 h et 7 h 30 et de 45 à 50°C entre 10 h et 16 h avec des pointes de 55 à 57°C.

L'hygrométrie et la température à l'intérieur de la cabine de séchage suivent une courbe relativement semblable à celle de l'air ambiant avec cependant un temps de latence de 30 à 45 minutes le matin, et d'environ 60 minutes en fin d'après-midi. Cela peut s'expliquer, pour la matinée, par le fait que les éléments du séchoir absorbent une certaine quantité de chaleur pour se porter à la température de l'air et, en fin d'après-midi par le fait que les parois du séchoir, les claies et les produits ont emmagasiné une certaine quantité de chaleur dont la restitution freine la baisse de la température de l'air.

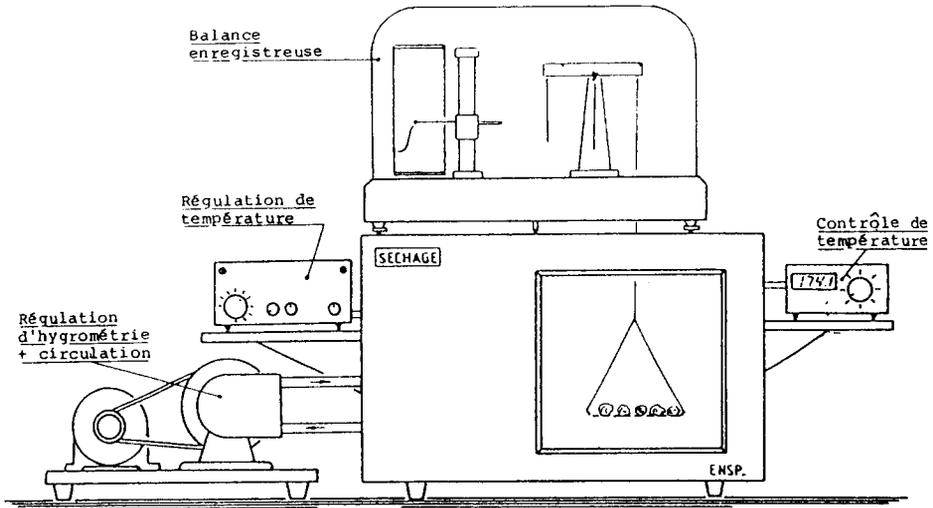


Fig. 1. Construction de l'enceinte de séchage.

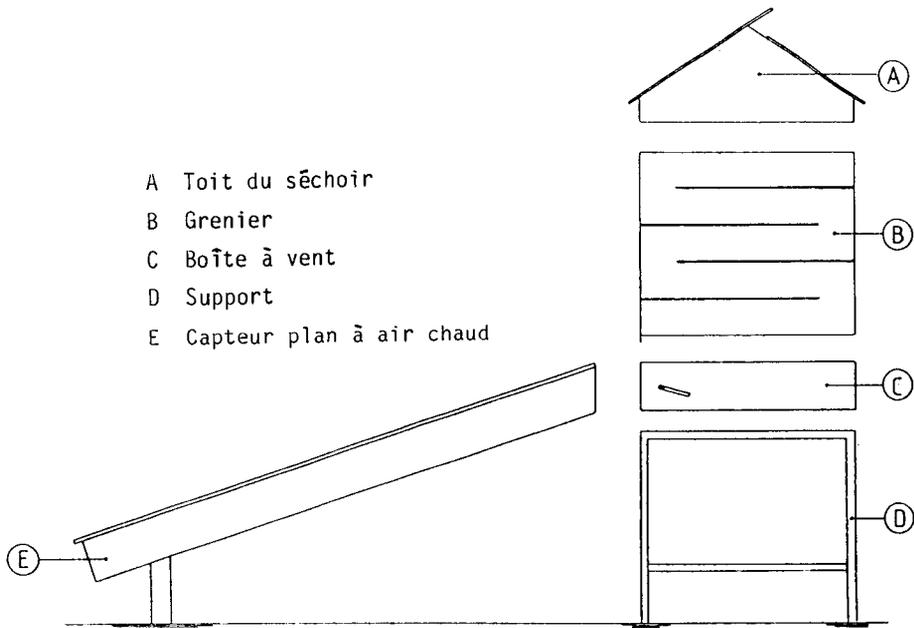


Fig. 2. Constitution du séchoir expérimental.

Les feuilles d'Amaranthus hybridus

Les feuilles utilisées ont été récoltées dans un champ situé dans une vallée inondée proche de Yaoundé pendant la période d'octobre 1985

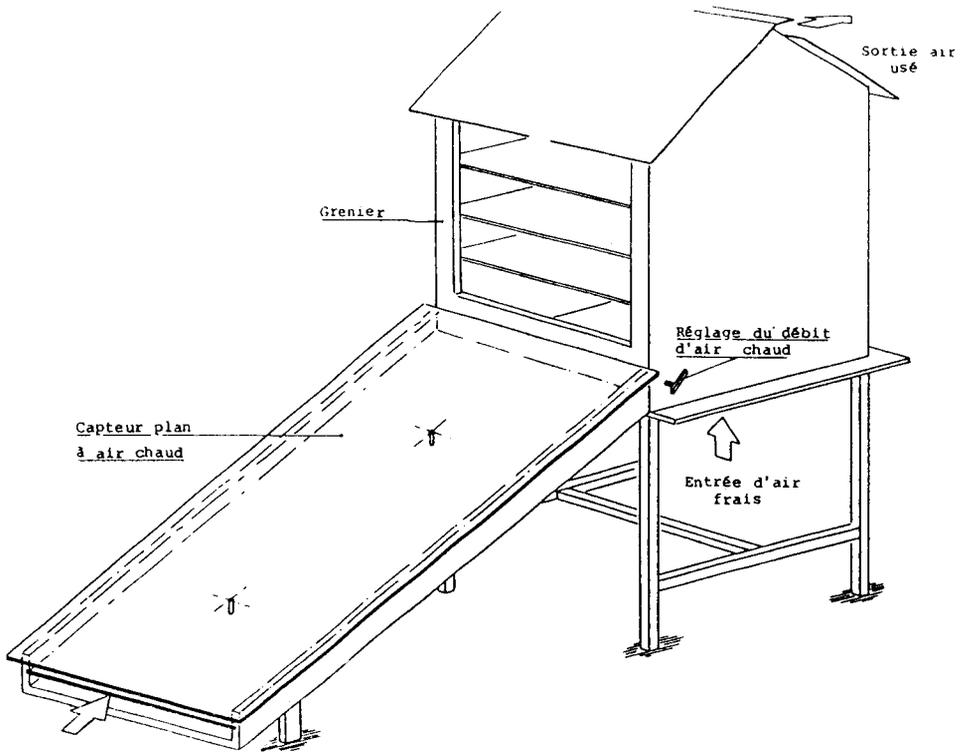


Fig. 3. Vue d'ensemble du séchoir expérimental.

à mai 1986. Ces feuilles ont été travaillées moins de 24 heures après leur récolte.

Les feuilles ont été séparées de leurs tiges à la main, les nervures n'étant pas séparées des feuilles. Ensuite, elles ont été préparées suivant les méthodes traditionnelles utilisées par les populations de la partie sud du Cameroun pour cette variété de légumes et selon la recette habituelle du ndolé.

Les feuilles, séparées de leurs tiges, sont découpées au couteau, lavées et mises à bouillir pendant 10 à 30 minutes. Les feuilles cuites sont ensuite lavées à l'eau froide et essorées à la main.

Le produit ainsi obtenu a été divisé en trois parties : une partie est utilisée pour étudier la vitesse de séchage sous différentes conditions; une partie est séchée en étuve, jusqu'à l'obtention d'une masse constante, pour déterminer la teneur initiale en eau et une dernière partie est séchée au séchoir solaire pour servir aux tests de dégustation et de conservation.

Les légumes ont été séchés sous forme de boulettes de 0,5 à 1,5 cm d'épaisseur, étalées en couche de 1 à 4 cm d'épaisseur dans un séchoir solaire à capteur plan. Les produits ont été chargés sur des claies à différentes densités : 4; 4,5; 5; 6 et 6,5 kg/m². Les produits ont été séchés jusqu'à une teneur en eau de 8,75 à 9 %.

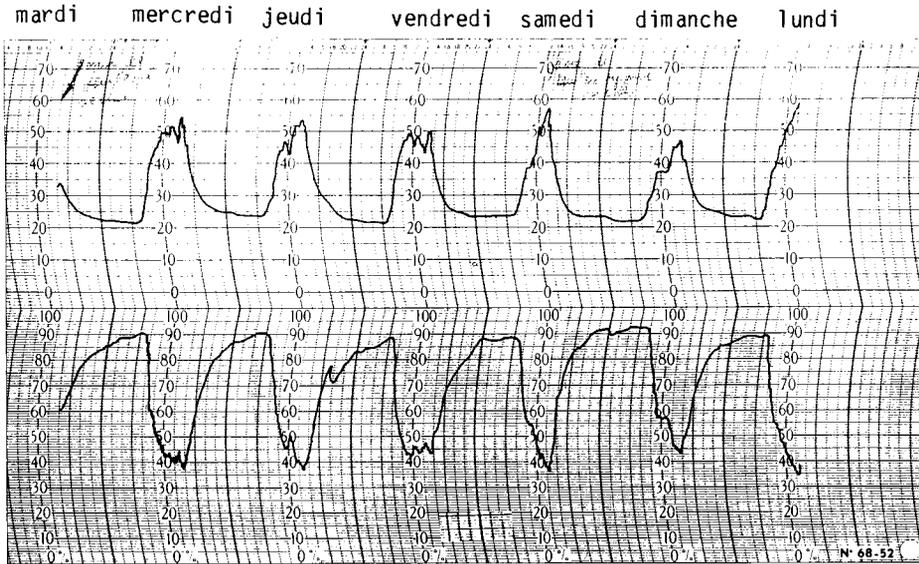


Fig. 4. Variation de température et d'hygrométrie.

Les produits séchés ont été emballés dans des sacs de plastique thermosoudés et stockés dans les conditions ambiantes (25 à 28°C), à l'abri de la lumière et de l'humidité.

À titre d'essai de résorption d'eau, les légumes séchés ont été exposés à de l'air humide à 90 % à 23°C pendant 48 à 72 heures. Le gain de poids a représenté de 8,6 à 17,0 % de la masse initiale des légumes.

Nous avons aussi procédé à des essais de reconstitution. Les légumes préparés et mis à sécher perdent 88 % de leur masse à la fin du séchage. Lors de la réhydratation, les produits secs sont plongés dans de l'eau bouillante pendant 30 minutes et de nouveau pressés et pesés. Les légumes ainsi traités absorbent 2,25 fois leur masse d'eau. Les produits réhydratés représentent 337 % de la masse initiale de légumes secs. Par rapport à la masse des légumes avant séchage, le gain final de masse n'est plus que de 40 %.

La déshydratation des légumes

Les légumes, du point de vue de leur comportement technologique, sont des corps colloïdaux à structure capillaroporeuse. Une telle structure facilite la migration de l'eau dans le produit lors du séchage. L'évaporation de l'eau commence dès que la pression partielle de vapeur d'eau au niveau du produit (P_v) devient supérieure à celle de l'atmosphère ambiante (P_a). Au-delà d'un certain temps optimal de cuisson, qui permet de satisfaire aux exigences de neutralisation des ferments des légumes, toute prolongation du temps de cuisson ramollit les légumes, ce qui crée une contrainte supplémentaire à la circulation de l'eau. Ces légumes perdent ainsi des substances solubles et s'enrichissent en eau.

La technologie traditionnelle de préparation fait intervenir un pressage manuel, direct ou à l'aide d'un sac en jute, des légumes bouillis. Le presseur manuel, fabriqué à l'École nationale supérieure polytechnique (ENSP), donne des résultats pratiquement similaires au pressage manuel traditionnel à l'aide d'un sac en jute.

L'humidité initiale du produit, par rapport à sa masse sèche, varie de 400 % à 650 %. Sa masse sèche, par rapport à la masse initiale varie de 18,6 à 20 %. Cette variation est fortement fonction de la technologie de préparation du produit : technique de préparation des légumes; technique de pressage (pression appliquée, durée d'application de cette pression) et durée du blanchissement du produit.

Nous retenons donc comme humidité moyenne de légumes bouillis, par rapport à la masse sèche, la valeur de : $W^S = 467,55 \%$ ce qui correspond à une teneur en humidité, par rapport à la masse initiale de l'échantillon de 81,98 %.

Étude des caractéristiques d'échange de masse lors de la déshydratation des légumes

Le séchage d'une couche mince de produit permet de mettre en évidence, à l'aide de la courbe de sa vitesse d'évaporation en fonction du temps (fig. 5), deux phases : premièrement, la phase de mise en température, qui dure le temps d'équilibrer le transfert de vapeur hors du produit avec le transfert de chaleur vers le produit et deuxièmement, la phase à vitesse constante, dont les caractéristiques sont essentiellement des types prédominants d'eau qui constituent l'humidité du produit.

Dans les échantillons de légumes préparés suivant les techniques étudiées, il y a de fortes présomptions que l'eau d'imprégnation soit largement prépondérante. Il s'agit de l'eau libre retenue mécaniquement entre les particules de légumes et entre les parois de ces particules et de l'eau liée par des forces d'osmose. Le pourcentage de cette eau par rapport à la teneur globale en eau des légumes n'a pas été déterminé au cours de cette étude.

Fournier (1979) a établi une représentation schématique du mode de fixation de l'eau dans le grain à 15°C (fig. 6).

Résultats et discussions

Les légumes préparés suivant les méthodes traditionnelles et pressés à la main ont une teneur en eau, par rapport à la masse initiale, de 86 %. Des légumes découpés plus grossièrement, chaque feuille étant coupée en 4 à 6 parties et préparée dans les mêmes conditions, ont une teneur en eau de 82 % (tableau 1). On constate que la durée de cuisson n'apporte aucune amélioration à la teneur en matière sèche. Au contraire, elle contribue à la réduction de ces matières.

Selon les exigences de la cuisine traditionnelle, les légumes destinés à accompagner les sauces doivent avoir des dimensions précises. L'étude d'un large échantillon de légumes préparés suivant

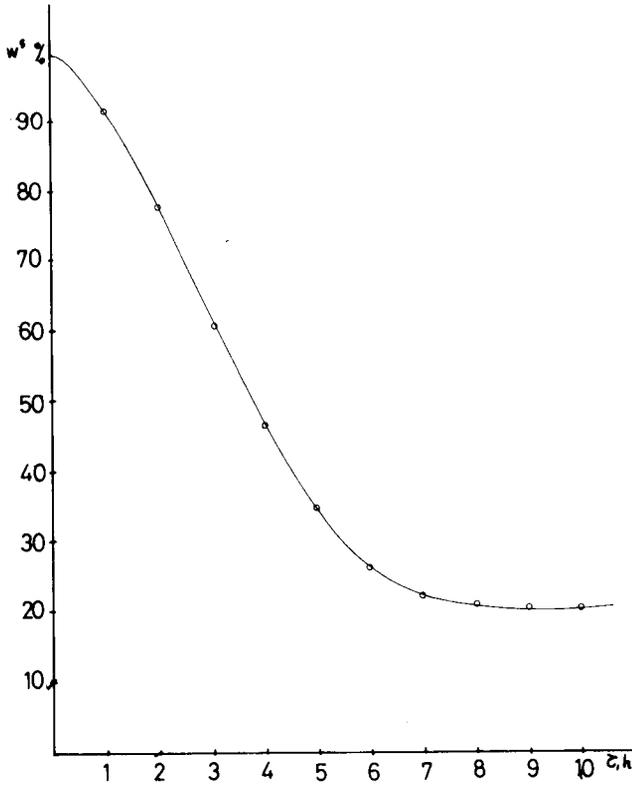


Fig. 5. Variations de l'humidité de l'échantillon en cours de séchage.

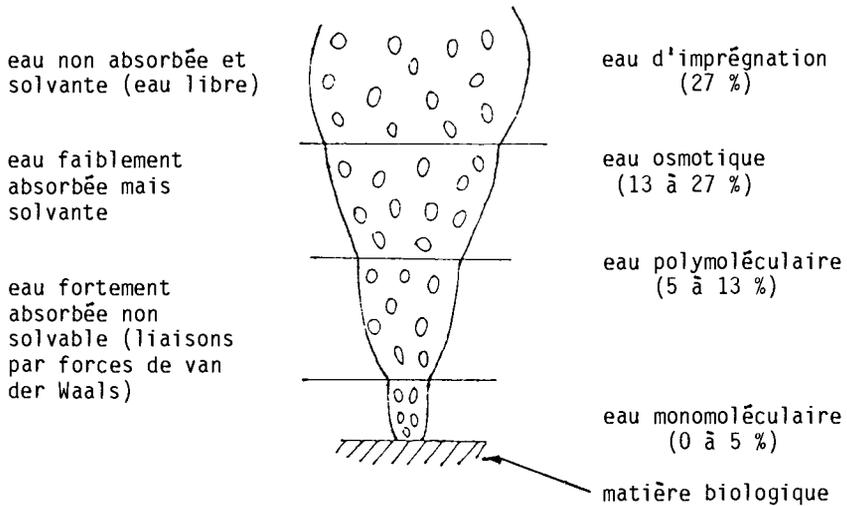


Fig. 6. Représentation schématique du mode de fixation de l'eau dans le grain (maïs) à 15°C.

Tableau 1. Teneur initiale en matières sèches des légumes selon la méthode de préparation.

Méthodes de préparation	Teneur en matières sèches par rapport à la masse initiale
Préparation traditionnelle (coupe fine, 30 minutes de cuisson, pressé à la main)	14,38
Même préparation, mais pressage à l'aide d'un presseur manuel	14,78
Même préparation et pressage (temps de cuisson de 15 minutes)	18,59
Coupe grossière, cuisson de 15 minutes et presseur manuel	17,76
Feuilles entières, cuisson de 15 minutes et presseur manuel	19,94

les méthodes traditionnelles a donné la répartition ci-dessous, en pourcentage des particules de feuilles rencontrées dans une masse prête à être ajoutée aux sauces. Le décompte a été réalisé par étallement, sur une feuille millimétrée, des particules humides de légumes contenues dans une masse de 2 g.

Le contour de chaque particule est matérialisé grâce à la chlorophylle dont elle est riche et qui balise la surface occupée par la particule humide, avant que ne commence son dessèchement. En tout, 351 particules de plus de 3,3 mm de longueur et 12,5 mm de surface ont été dénombrées. Les plus grandes particules, soit 22 % du total, ont une superficie supérieure ou égale à 650 mm² et les plus petites, inférieure à 12,5 mm² (tableau 2). Les particules dénombrées ont été regroupées selon leur superficie :

Tableau 2. Répartition des particules de légumes selon la taille.

Superficie (mm ²)	Dimensions (mm)	Nombre	% du total
≥ 650	>26 x 25	77	21,9
649-350	>25 x 14	99	28,2
349-100	>20 x 5	31	8,8
99-50	>15 x 3,5	32	9,1
49-12,5	>7,5 x 1,5	49	14,0
<12,5	<7,5 x 1,5	63	18,0

Essais comparatifs de séchage de légumes

La figure 7 présente les courbes de déshydratation des légumes séchés en couches de densités de $14,8 \text{ kg/m}^2$ (boules de 10 g), $8,5 \text{ kg/m}^2$ (boules de 5 g), $4,6 \text{ kg/m}^2$ (boules de 2,5 g) et 3 kg/m^2 environ (largement étalés). Le temps de séchage jusqu'à sa masse constante à une température de 48°C et 54% d'hygrométrie de l'air est présentée au tableau 3. Le taux de séchage peut également être exprimé comme étant la vitesse de perte d'eau en fonction des matières sèches résiduelles (fig. 8) ou en fonction du temps (fig. 9) ou encore la vitesse de perte de masse en fonction du temps (fig. 10).

Tableau 3. Temps de séchage des légumes selon la dimension des plus grosses particules.

	(g)			Légumes finement étalés	Feuilles préparées entières et étalées finement
	10	5	2,5		
Densité (kg/m^2)	14,8	8,5	4,6	3,0	3,0
Temps en heures	16,7	14,7	10,0	4,0	6,0

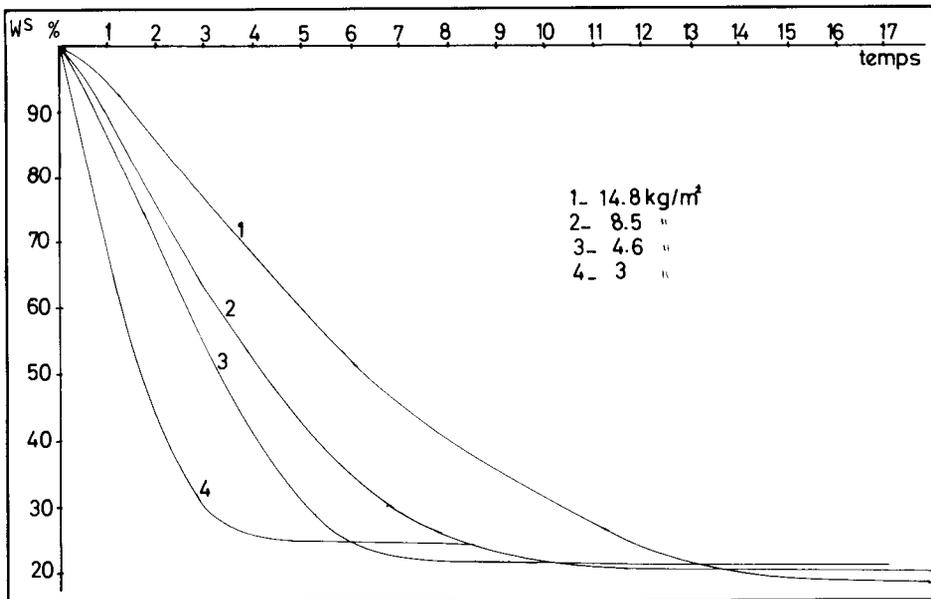


Fig. 7. Courbes de séchage en fonction de la densité d'étalement.

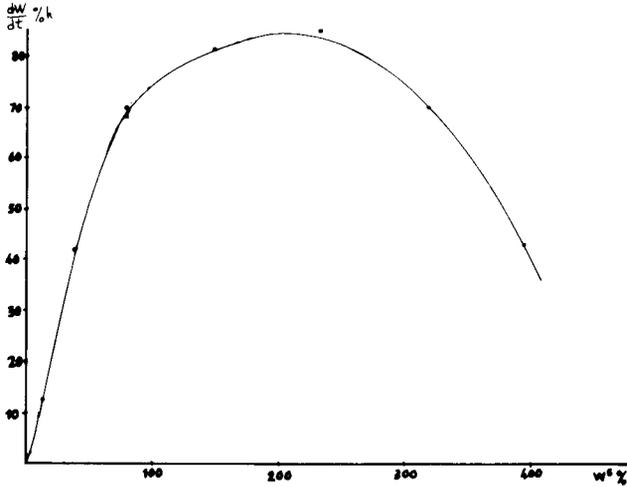


Fig. 8. Vitesse de perte d'eau en fonction des matières sèches résiduelles.

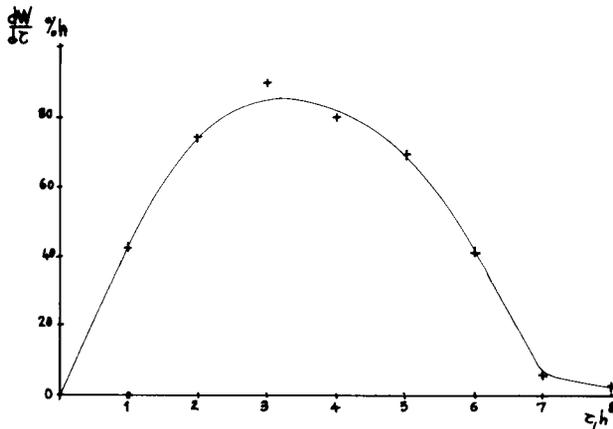


Fig. 9. Vitesse de perte d'eau en fonction du temps.

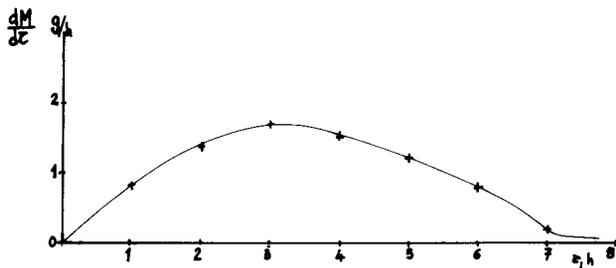


Fig. 10. Vitesse de perte de masse en fonction du temps.

Conclusion

Dans les conditions de séchage solaire indirect en régime de convection naturelle, la meilleure option semble être de favoriser les faibles densités d'étalement des produits pour faciliter la circulation de l'air. Dans les conditions de la région de Yaoundé, des feuilles découpées grossièrement et étalées à la densité de 3 kg/m^2 permettent de réaliser le cycle de séchage en une seule journée, à la condition de porter les produits au séchoir dès 7 h le matin. La teneur finale en eau des légumes secs est de 10,5 à 12,0 %. La cuisson prolongée des légumes à sécher ne semble pas être justifiée.

Bibliographie

- Fournier, M. 1979. Communication présentée au colloque sur la conservation des denrées alimentaires cultivées en climat chaud et humide. YAOUNDÉ, 5 au 10 novembre 1979, Association des universités partiellement ou entièrement d'expression française (AUPELF).
- Masseyeff. 1958. Industries agricoles et alimentaire en zones tropicales et sub-tropicales 1958.
- Tchiengue, E. et E. Kaptoum. 1983. Le séchage des fruits, légumes et tubercules au Cameroun. Communication à la présentation d'experts sur les possibilités de développer les techniques de séchage solaire en Afrique, ROME.

APERÇU DU SÉCHAGE SOLAIRE DU POISSON EN GAMBIE

A.E. N'Jai¹

Résumé — En Gambie, on a mis à l'essai trois types de séchoirs solaires — ayant la forme d'une tente, d'une case et d'un dôme — chargés de poisson fermenté. Bien qu'on n'ait pu réduire de manière importante le temps de séchage, on a pu accroître la qualité du produit en diminuant la contamination par la poussière et l'infestation par les mouches à viande. On propose d'examiner d'autres secteurs de la préparation du poisson séché par le secteur artisanal.

Introduction

Pour diminuer les pertes de poisson et de produits de la pêche après leur prise, on améliore à l'heure actuelle la technique traditionnelle du conditionnement en Gambie. Il s'agit, entre autres, d'améliorer le fumage et le séchage du poisson, dans ce dernier cas, en adoptant des séchoirs solaires construits à l'aide de matériaux bon marché disponibles sur le marché local.

En 1983, dans le cadre d'un projet de séchage solaire, le ministère des Pêches de la Gambie a effectué une petite étude (les données sont inédites) afin d'évaluer la quantité possible de poisson séché provenant des prises artisanales. Au total, les prises artisanales atteignaient 8 456 t dont 1 952 t étaient composées de poissons pélagiques. De ces 1 952 t, tous les tambours (*Otolithus brachygnathus*), les requins et les raies ont probablement été séchés à l'air libre étant donné qu'il s'agit de la seule utilisation de ces espèces. Parmi le reste des poissons pélagiques (1 656 t), surtout des mérours, des tambours, des grondeurs et des trichiures, environ 45 % à 50 % auraient été séchés à l'air libre. Les prises de trichiures ont atteint 765,5 t et vu qu'une petite quantité seulement de cette espèce est fumée pour la consommation locale, il est raisonnable de croire que près de 70 % de ces poissons ont été séchés naturellement. Les limaces de mer sont également séchées à l'air libre pendant presque toute l'année, mais il est difficile d'obtenir des données sur les quantités en cause.

Étant donné qu'une quantité importante des prises artisanales sont séchées à l'air libre, une technique qui comporte plusieurs problèmes et limitations entraînant des pertes, on a jugé que l'utilisation de séchoirs solaires aiderait grandement à réduire les pertes pendant le séchage, plus particulièrement au cours de la saison des pluies. Bien qu'on n'ait jamais tenté de quantifier systématiquement les pertes, il semblerait, d'après de nombreuses

1. Ministère des Pêcheries, Banjul, Gambie.

observations, qu'elles soient assez élevées et que les infestations par les insectes soient courantes. Les problèmes dus aux infestations s'aggravent pendant la saison des pluies. Ainsi, en supposant que l'on ne tienne pas compte de l'écart de rendement par rapport au séchage à l'air libre, l'utilisation de séchoirs solaires jouera un rôle de premier plan dans la technique du conditionnement du poisson en Gambie (N'Jai, 1985a).

En 1983, avec l'aide des représentants du Programme de l'énergie en Afrique du Commonwealth Science Council (CSC), le ministère des Pêcheries lançait un projet pilote de séchage solaire. Dès les débuts, on a adopté un modèle de séchoir du type "tente solaire" (fig. 1). Doe et al. (1977) avaient déjà effectué des essais sur ce séchoir, mais il a été modifié par la suite et soumis à de nouveaux essais par Trim et Curran (1983). Si le projet actuel a vu le jour, c'est grâce aux résultats généralement favorables indiqués dans les deux études précédentes et aussi parce que le séchage du poisson est une activité traditionnelle largement pratiquée en Gambie.

Toutefois, vers la fin de 1984, avec l'aide de l'Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), des expériences ont eu lieu sur un séchoir commercial d'une capacité d'une tonne de poissons. Ce séchoir en forme de dôme (fig. 2) comporte une ossature métallique et des crochets pour suspendre le poisson pendant le séchage (fig. 3). Plus récemment, on a modifié la tente solaire pour lui donner la forme d'une case (fig. 4) puis on a soumis les deux modèles à des tests pour en déterminer l'efficacité et la capacité.

Le présent document résume les expériences effectuées à l'aide de trois modèles de séchoir et tient compte des répercussions des facteurs socio-économiques sur ce genre de transfert technologique dans des pays en développement comme la Gambie.

Matériaux et méthodes

Étant donné les contraintes liées aux prises artisanales et à l'achat des poissons débarqués, il était difficile d'obtenir les mêmes espèces dans tous les groupes à sécher. Voici les espèces qui ont été utilisées : bonga (aloses), tambours, trichiures, maquereaux et poissons-chats.

Comme le consommateur gambien délaisse le poisson non fermenté, tous les essais sur des produits du poisson ont été effectués avec des poissons fermentés. La fermentation a lieu en plaçant les poissons dans des contenants en plastique ou dans des réservoirs de ciment recouverts de polyéthylène, pendant une nuit. Après la fermentation, on a pesé (environ 340 kg) tous les spécimens de poisson et on les a répartis en deux groupes égaux, l'un destiné au séchage solaire et l'autre au séchage à l'air libre. Puis les échantillons ont été égouttés, lavés et salés. Vu que le poisson perd de sa rigidité après la fermentation, il a été quelquefois difficile de le manipuler pendant l'égouttage et le lavage parce que sa peau se désintègre.

On a ensuite placé les poissons en question dans le séchoir ou sur des supports de bois à l'air libre. Avant le séchage et à intervalles réguliers par la suite, on a consigné la température et l'humidité à la fois dans le séchoir et à l'extérieur. À la fin du

séchage, on a procédé à une nouvelle pesée des échantillons et déterminé la teneur finale en eau à l'aide d'un hygromètre à balance Ohans 5100 HE.

Comme le séchage devait se poursuivre pendant plusieurs jours, on a fermé, chaque jour avant le coucher du soleil, les entrées d'air des séchoirs et recouvert de polyéthylène transparent le poisson laissé à sécher à l'air libre.

Séchoirs

Tous les séchoirs fonctionnent par convection naturelle et sont situés à proximité des rives où sont débarquées les prises artisanales.

Tente de séchage solaire

Comme son nom l'indique, ce séchoir en forme de tente comporte une ossature en branches de palmier rhun, bois peu coûteux que l'on peut se procurer localement. À l'intérieur du séchoir se trouvent deux supports rectangulaires (fig. 5) qui s'étendent de chaque côté du séchoir. Sur ces supports repose un treillis de tiges de bambou (kirinting) qui sert à transporter le poisson pendant le séchage.

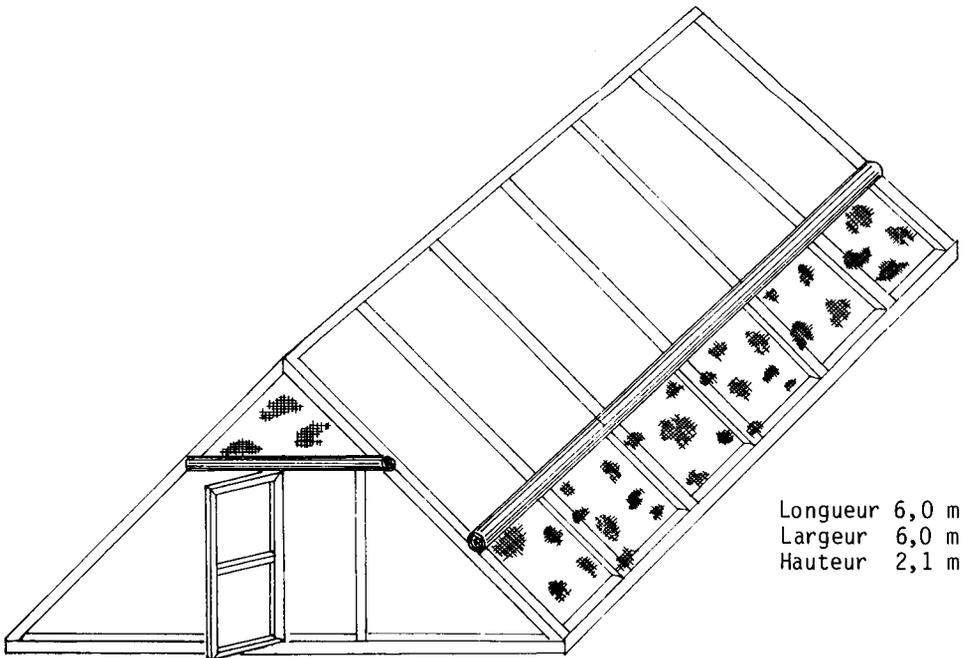


Fig. 1. Séchoir tente solaire.

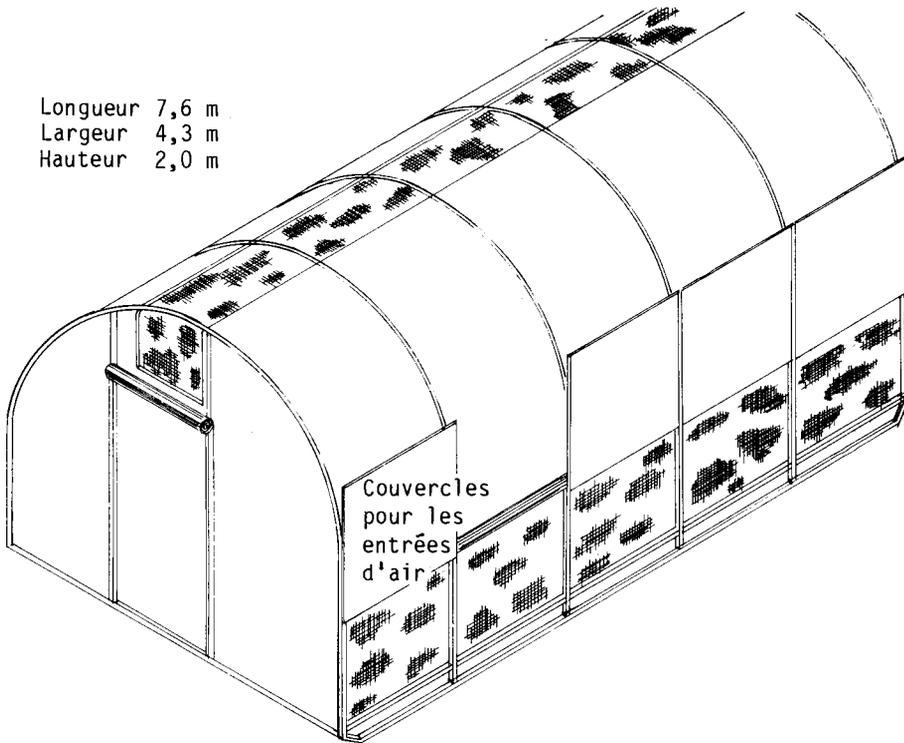


Fig. 2. Séchoir solaire à dôme.

Tout le séchoir est recouvert de polyéthylène transparent à l'exception de la base et des murs d'extrémité où l'on a pratiqué des entrées d'air. Les entrées d'air à la base s'étendent sur toute la longueur du séchoir et, comme celles dans le haut, sont fermées par des moustiquaires de plastique pour garder les mouches à l'extérieur du séchoir. Une porte a été aménagée à une extrémité du séchoir.

Sous les supports de séchage, on a disposé des tôles en métal noir qui agissent comme capteurs solaires. Le séchoir a 6 m de longueur, 6 m de largeur et 2,1 m de hauteur tandis que les supports ont 1,5 m de largeur, 5,7 m de longueur et 0,8 m de hauteur chacun. Les entrées d'air latérales ont 0,5 m de hauteur et 6,0 m de longueur. Les entrées d'air supérieures ont une forme triangulaire. Celle située sur le devant du séchoir a une superficie de 0,7 m² alors que celle à l'arrière est un peu plus petite (la différence est attribuable à un problème de construction et n'avait pas été prévue).

Séchoir solaire de type case

À l'instar de la tente solaire, le séchoir de type case présente une ossature faite en tiges de palmier rhun et renferme deux supports de séchage sous lesquels ont été placées des tôles en métal noir. La structure est une adaptation de la tente solaire sauf qu'elle est montée sur poteaux et poutres à 1 m du sol pour lui donner la forme

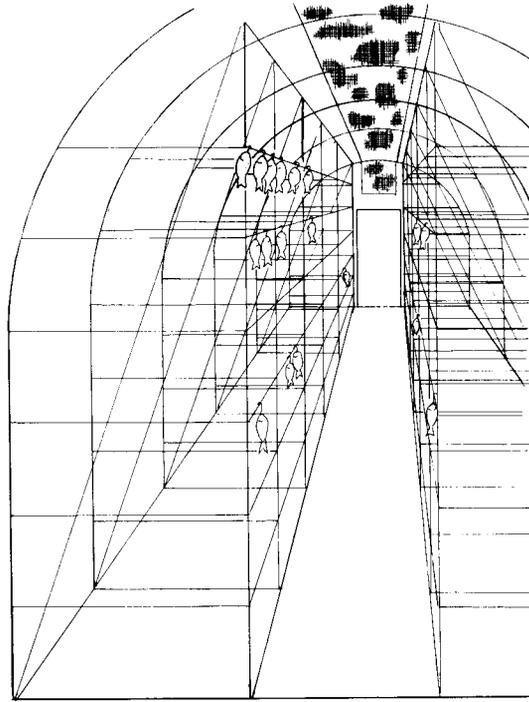


Fig. 3. Poissons suspendus à des crochets à l'intérieur du dôme solaire.

d'une case. Le séchoir a 6,0 m de longueur, 4,0 m de largeur et 2,3 m de hauteur. Les supports de séchage ont 0,8 m de hauteur, 1,0 m de largeur et 5,7 m de longueur. Les entrées d'air latérales ont 1 m de largeur sur 6,0 m de longueur alors que les événements supérieurs présentent une superficie de 0,5 m² chacun (à l'avant et à l'arrière).

Le séchoir est recouvert de polyéthylène transparent résistant aux rayons ultra-violet, alors que les entrées d'air sont fermées par une moustiquaire de plastique pour garder les mouches à l'extérieur.

La capacité du séchoir case et du séchoir tente fluctue entre 400 kg et 500 kg bien que nous n'ayons pu les charger à pleine capacité pendant les essais à cause d'un manque de poisson.

Séchoir solaire à dôme

Le séchoir à dôme a été fabriqué au Royaume-Uni par la firme Clovis Land et fourni au ministère des Pêcheries à titre de subvention de la FAO. D'une capacité d'une tonne, on l'utilise essentiellement dans des exploitations commerciales sur grande échelle. Il mesure 7,6 m de longueur, 4,3 m de largeur et 2,0 m de hauteur. Sa structure se compose de six arches métalliques recouvertes de polyéthylène transparent résistant aux rayons ultra-violet. À l'intérieur du dôme, un ensemble de poutres verticales et horizontales permet de suspendre le poisson à des crochets.

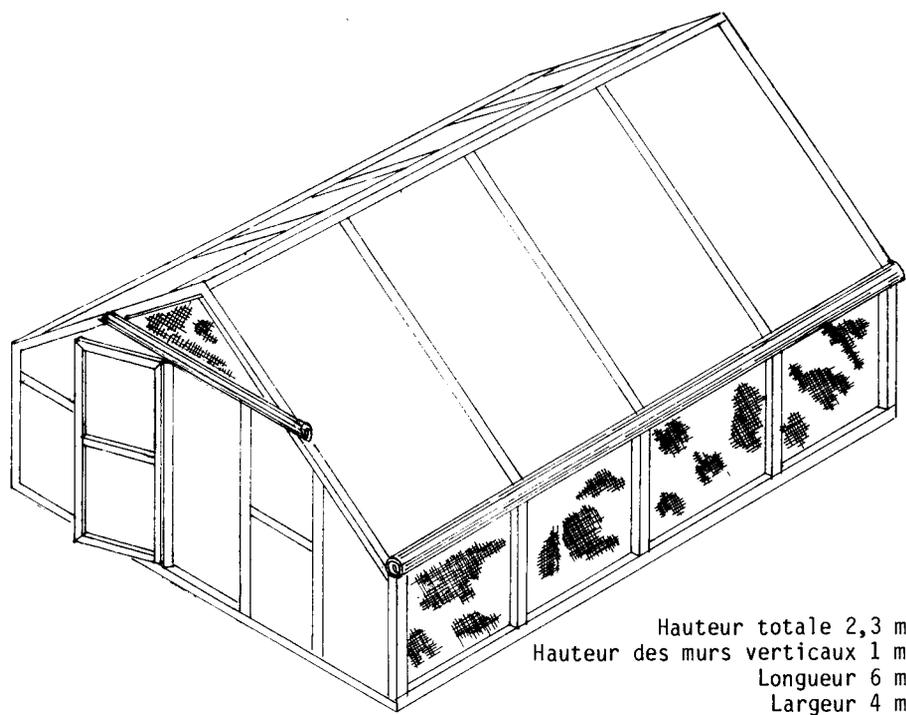


Fig. 4. Séchoir de type case.

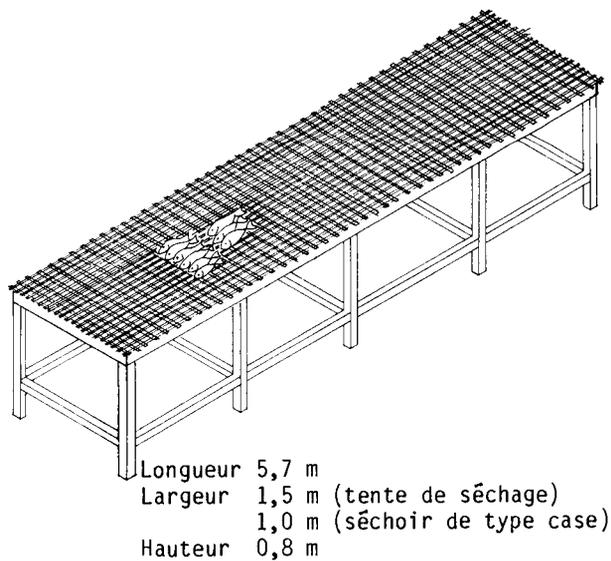


Fig. 5. Support de séchage dans une tente solaire.

Il y a une porte à l'avant et à l'arrière recouverte chacune de plastique. On trouve des événements le long des murs latéraux et tout le long de la partie centrale de la toiture. Comme dans les autres séchoirs, les événements sont recouverts de moustiquaire plastique. On peut les fermer grâce à une pièce de métal coulissant le long d'un axe vertical. Au lieu d'utiliser des tôles comme capteurs pour le séchoir, le plancher de ciment a été peint en noir.

Résultats

On a observé de légers écarts de température et d'humidité entre le modèle tente et le modèle case (chargés tous les deux), mais les deux ont élevé la température intérieure au-delà de la température ambiante tout en faisant diminuer l'humidité relative par rapport à l'extérieur, aux mois de janvier (tableau 1) et de mai (tableau 2). On suppose que les écarts de température et d'humidité entre les deux séchoirs et avec les valeurs ambiantes auraient été beaucoup plus élevés si l'on avait aménagé les séchoirs à l'intérieur des terres et non près de la plage. Près des plages, les conditions climatiques ne sont pas nécessairement les mêmes qu'à l'intérieur du continent, ce qui peut influencer sur les paramètres. Ce sont habituellement des endroits venteux et d'une humidité relative élevée.

Globalement, les séchoirs n'ont pas permis de réduire de façon notable le temps de séchage par rapport au séchage à l'air libre (tableaux 3-5), mais on a jugé que ce faible écart, combiné à l'importance des séchoirs pendant la saison des pluies, était absolument essentiel pour améliorer la technique traditionnelle de séchage.

Discussion

L'utilisation des séchoirs solaires pour le séchage du poisson et des autres produits agricoles offre de vastes applications pour améliorer la technique traditionnelle dans la chaîne alimentaire : plus particulièrement, il y a possibilité de diminuer les pertes post-récolte, d'accroître la qualité du produit et, dans certains cas, de réduire le temps de séchage. Les résultats exposés ici représentent une série d'essais qui s'attachent à l'aspect utilitaire des séchoirs solaires, dont le but est de réduire les pertes et d'accroître la qualité, plutôt que sur le mécanisme de fonctionnement des séchoirs et les procédés de séchage.

Bien qu'il y ait eu mesure de la température et de l'humidité à des intervalles périodiques pendant les essais, nous n'avons pas nécessairement l'intention de calculer l'efficacité accrue, le rayonnement solaire et d'autres paramètres mécaniques, mais bien de déterminer s'il existait des différences marquées dans le processus d'utilisation entre les séchoirs et les conditions ambiantes ainsi qu'entre les divers types de séchoirs.

Dôme solaire

Les essais effectués au cours de l'étude n'ont pas indiqué une différence très importante entre le séchage solaire et le séchage à l'air libre en ce qui touche la teneur finale en eau (tableau 5), la

Tableau 1. Comparaison des températures et des niveaux d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur de séchoirs tente et de séchoirs de type case pendant deux essais effectués en janvier 1986.

Date	Heure du jour	Séchoir tente		Séchoir de type case		Conditions ambiantes	
		T °C	Taux d'humidité	T °C	Taux d'humidité	T °C	Taux d'humidité
<u>1er essai</u>							
10.1.86	13 h 45	33	17	38	21	31	29
	15 h 45	38	30	37	22	34	22
11.1.86	13 h 50	31	29	35	20	32	22
12.1.86	11 h 00	27	24	25	27	23	24
	14 h 00	34	24	37	9a	30	20
	16 h 15	32	19	30	20	29	19
13.1.86	9 h 50	23	29	21	26	19	36
	13 h 30	32	23	29	27	26	28
	14 h 45	31	24	29	18	26	23
14.1.86	9 h 30	23	29	21	32	21	32
	13 h 00	31	18	30	28	28	26
<u>2e essai</u>							
17.1.86	14 h 30	40	20	35	14	30	24
18.1.86	13 h 30	30	24	29	26	26	28
19.1.86	9 h 30	29	26	28	26	22	22
	12 h 30	31	12	39	9a	26	-
	16 h 00	35	12	32	14	31	12
20.1.86	14 h 00	31	18	28	22	23	34
	16 h 00	34	18	31	18	26	28
21.1.86	9 h 15	20	31	19	22	19	28
	12 h 30	30	24	28	22	26	32

a Valeurs douteuses.

Tableau 2. Comparaison des températures et des niveaux d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur d'un séchoir solaire à dôme pendant deux essais effectués en mai 1985.

Date	Heure du jour	Dôme solaire		Conditions ambiantes	
		T °C	Taux d'humidité	T °C	Taux d'humidité
1er essai					
17.5.85	10 h 17	30,5	56	21,5	86
	11 h 50	27,5	67	22,5	86
18.5.85	12 h 19	24,0	70	23,0	77
19.5.85	10 h 30	27,0	70	23,0	83
	14 h 30	33,0	51	27,0	63
20.5.85	11 h 21	31,0	54	24,0	76
2e essai					
22.5.85	9 h 10	29,5	62	25,0	76
	14 h 50	27,5	72	25,0	76
23.5.85	10 h 30	28,0	71	24,0	84
	14 h 00	29,0	72	25,0	82
24.5.85	-	-	-	-	-
25.5.85	11 h 45	29,5	51,5	26,5	68
	14 h 10	31,5	66	27,5	74,5

Tableau 3. Teneur finale en eau (%) des échantillons aux termes de trois méthodes de séchage.

Espèces	Tente solaire	Case	Claies traditionnelles à l'air libre
Bongas	62	61	65
Albulas	55	48	- ^a
Tambours	41	-	-
Trichiures	-	40	-
Maquereaux	40	-	-

^a À cause de problèmes techniques, on n'a pu mesurer la teneur en eau de tous les échantillons après la période de séchage.

diminution de poids et le taux de séchage (N'Jai, 1985). En fait, au cours d'expériences précédentes (Curran, 1984), "on a obtenu des taux de séchage très semblables pour le séchage à l'air libre et le séchage solaire de plusieurs produits différents et l'infestation par la mouche à viande pourrait constituer un problème". Toutefois, pendant la saison des pluies, beaucoup de facteurs ont contribué à la prolifération de la mouche à viande qui pose des risques au séchage du poisson et rend les infestations difficiles à éviter. Walker et Wood (1985) ont fait remarquer qu'"on en connaissait très peu sur les mécanismes réels d'infestation par la mouche à viande et que le

Tableau 4. Poids des échantillons avant et après le séchage dans la tente solaire et la case par comparaison au séchage à air libre (les résultats sont représentatifs pour seulement un essai).

Espèces	Tente solaire	Case	Claies à l'air libre
Poids des échantillons (kg)			
au début	168,7	168,6	168,0
après 4 jours de séchage	93,8	94,6	118,9
Diminution de poids en %	44,4	43,9	29,3

Tableau 5. Teneur en eau (%) des espèces de poisson après le séchage pendant deux essais effectués en mai 1985.

Espèces	Séchage solaire	Séchage à l'air libre
<u>1er essai</u>		
Albula (tambour)	39	39
Maquereau	38	42
Poisson-chat	39	29
Trichiure (Cheken)	40	38
Cépole (brochet)	40	52
<u>2e essai</u>		
Tambour	36	15 ^a
Maquereau	45	44
Poisson-chat	40	40

^a Petites tranches.

problème se généralise au cours du séchage à l'air libre sous des conditions climatiques néfastes; c'est l'une des plus grandes causes de perte du poisson traité en Afrique".

Bien qu'elles fluctuaient à différents moments de la journée et d'un jour à l'autre, les températures enregistrées à l'intérieur du dôme n'ont pas été suffisamment élevées pour tuer les mouches qui pénétraient dans le séchoir. Doe (1979) a signalé que des températures de plus de 60°C détruisaient la mouche à viande mais qu'elles pouvaient aussi avoir des effets néfastes sur la qualité nutritive du poisson (FAO, 1981).

À certains moments, le temps était plutôt brumeux, très venteux et obscurci à l'occasion par une couverture nuageuse, empêchant ainsi une insolation élevée et faisant baisser la température à l'intérieur du séchoir. En outre, comme les événements et les portes ne se fermaient

pas hermétiquement, il a été difficile de contrôler le débit de l'air à l'intérieur du séchoir. Il aura pu se produire une surventilation qui expliquerait en partie le faible rendement observé. On n'a constaté aucun écart évident dans le temps de séchage entre les claies à l'air libre et le séchoir, de sorte que les produits séchés au soleil ont pu être prêts en même temps que ceux qui avaient été séchés dans une enceinte. Toutefois, les produits dans le séchoir avaient une meilleure apparence et contenaient moins de larves que les produits séchés à l'air libre.

Le capteur est une autre raison qui explique le faible rendement du séchoir. Il s'agissait d'une dalle de béton peinte en noir dont la valeur d'absorption est faible comparée à celle des tôles. Le taux d'absorption du rayonnement solaire dans la dalle est tellement faible qu'il ne réussit à faire monter que très lentement la température du séchoir. On a donc supposé que l'air circulant dans le séchoir et frappant le capteur présenterait un taux de réchauffement correspondant (N'Jai, 1985). L'emploi de capteurs solaires plus appropriés, comme des tôles peintes en noir ou du chlorure de polyvinyle noir (CPV), a donné des résultats plus encourageants ailleurs puisqu'il y a eu réduction du temps de séchage et diminution de la teneur finale en eau des produits (Doe et al., 1977; Doe, 1979).

Ainsi, s'il était possible de réduire la surventilation et d'accroître la surface des capteurs solaires, le dôme solaire pourrait être un excellent appareil pour le séchage commercial du poisson sur grande échelle dans le secteur artisanal. Sa charge d'une tonne est très satisfaisante et, comme tous les autres séchoirs, il présente un avantage très évident pendant les pluies. L'un des principaux inconvénients du dôme est qu'il faut suspendre le poisson à des crochets, ce qui restreint principalement le séchage à de petits poissons pélagiques ou à des morceaux de chair de poisson. Les gros poissons entiers ne peuvent être séchés puisqu'ils se détachent facilement du crochet.

Tente solaire et case solaire

Comme nous l'avons fait remarquer précédemment, il n'y a pas eu de différence marquée au niveau de la température et du niveau d'humidité à l'intérieur et à l'extérieur des séchoirs. Pendant les essais, cependant, le soleil a fait défaut et il a venté la plupart du temps. Nous étions à la saison fraîche (janvier) pendant laquelle les températures ambiantes sont généralement faibles et la couverture nuageuse, abondante.

Quoi qu'il en soit, d'après la diminution de poids en pourcentage pendant la période de séchage, les produits mis à sécher dans les deux séchoirs ont perdu beaucoup plus d'eau, réduisant ainsi le nombre de pertes dues aux insectes comparativement aux produits séchés à l'air libre.

Le séchoir de type case est une adaptation de la tente solaire et sa construction ne visait qu'à agrandir la structure pour en augmenter la capacité. Bien que l'on n'ait pu charger les deux séchoirs en même temps à cause d'un manque de poisson, les observations pratiques effectuées pendant les essais ont révélé que l'on n'avait pas augmenté assez la capacité du séchoir de type case; cependant, il était beaucoup plus facile d'y travailler.

Discussion générale

Les séchoirs solaires sont essentiels à l'amélioration de la technique de séchage traditionnelle du poisson. L'infestation par la mouche à viande, qui survient normalement au début du séchage lorsque le poisson renferme beaucoup d'eau, diminue considérablement avec l'utilisation d'un séchoir solaire. Ainsi, lorsqu'il s'agit de réduire les pertes post-récolte, plus particulièrement en empêchant la croissance et la prolifération des larves dans le poisson, il n'est pas nécessaire de restreindre l'introduction des séchoirs solaires à des essais d'efficacité visant à accroître le taux de séchage. Les séchoirs solaires peuvent donner des produits bien séchés et exempts de poussière tout en étant très utiles pendant la saison des pluies lorsque les mouches abondent et que le séchage traditionnel à l'air libre devient plus difficile. Même s'il est presque impossible dans des conditions climatiques normales d'éliminer complètement les mouches pendant le séchage du poisson, on peut atténuer de beaucoup le phénomène en recourant à des séchoirs solaires.

Même si on ne l'a pas évalué suffisamment, l'aspect technico-économique du séchage solaire du poisson est favorable en raison du faible coût des séchoirs et de leur facilité de construction. Le coût de construction d'une tente solaire s'élève à environ 500 DGM (1 dollar US = 0,1302 dalasi gambien (DGM)) tandis qu'il ne faut que deux jours pour en construire un, en tenant compte du transport des matériaux à l'emplacement. Le dôme solaire est un produit commercial très coûteux, mais les autres séchoirs sont d'un prix abordable et peuvent être achetés par un pêcheur ou par un groupe local. La seule difficulté est l'achat du polyéthylène spécial que l'on ne peut se procurer sur le marché local. Il y a aussi le problème que les produits séchés dans une enceinte solaire ne puissent se vendre à des prix plus élevés que les produits séchés à l'air libre étant donné que l'apparence prend une importance secondaire derrière le besoin de subsistance des consommateurs dans le pays.

Jusqu'ici, l'emploi des séchoirs solaires a véritablement stimulé l'intérêt et la participation des nationaux à un point tel que certains entrepreneurs ont manifesté le désir d'adopter ce type d'installation pour le séchage du poisson sur grande échelle. C'est d'ailleurs l'une des raisons pour laquelle on a voulu augmenter la capacité de la tente solaire en agrandissant sa structure. L'utilisation de grands séchoirs peut jouer un rôle important en améliorant la technique de séchage du poisson et en diminuant les pertes en Gambie. Pendant la saison des pluies où le séchage à l'air libre est difficile et l'approvisionnement de certaines espèces atteint un sommet, l'emploi des séchoirs solaires deviendra indispensable.

On a toutefois remarqué que l'introduction de toute nouvelle technologie dans le secteur traditionnel d'un pays en développement se heurte habituellement à des problèmes et à des contraintes à caractères essentiellement socio-économiques. Par exemple, les conditionneurs traditionnels qui séchent du poisson sont tous obsédés par le poids de leurs produits et préfèrent donc vendre un poisson plus gorgé d'eau puisqu'ils en retirent un bénéfice supérieur sur le marché de gros.

En outre, l'introduction des séchoirs solaires ne devrait pas se faire sans tenir compte des autres paramètres qui contribuent dans la pratique à réduire les pertes et qui ont aussi besoin d'être améliorés. Étant donné que la fermentation est une étape du processus traditionnel que l'on ne doit pas oublier si les produits sont destinés au marché local, cet aspect doit être amélioré. Il conviendrait également d'améliorer le salage, l'entreposage et l'emballage afin de ne pas être en reste par rapport à la nouvelle technique de séchage (N'Jai, 1985a).

Lorsqu'on tient compte de la technique générale de séchage à l'air libre des conditionneurs locaux, il peut sembler déraisonnable d'investir dans cette nouvelle technologie puisque même les produits bien séchés et plus propres commandent à peu près le même prix que les produits séchés par la méthode traditionnelle. Il est donc primordial de montrer aux conditionneurs locaux comment le séchage solaire peut diminuer leurs pertes et, partant, augmenter le poids du produit final (N'Jai, 1985a).

Il ne fait aucun doute qu'une telle démarche nécessiterait une campagne intensive et efficace de vulgarisation, surtout aux premières étapes d'introduction lorsque les collectivités visées manifestent à la fois scepticisme et enthousiasme. Parallèlement, il serait impératif que le personnel affecté aux activités de vulgarisation et de R&D de l'institution en cause entretiennent entre eux des relations étroites afin de reconnaître et de bien choisir les stratégies et les approches à utiliser au moment d'introduire la technologie.

Conclusion

Malgré tous les problèmes techniques et les nombreuses lacunes liés au séchage solaire en termes d'accroissement du taux de séchage et de l'amélioration de la qualité du produit, on ne peut nier que les séchoirs fabriqués sur place à un faible coût présentent des avantages importants en diminuant les pertes après la récolte dans le secteur traditionnel.

Les séchoirs solaires donnent des produits séchés ayant une durée de conservation assez longue. Les pertes en cours de séchage dues aux infestations par les insectes et par les larves deviennent très négligeables.

Dans le cas du séchage du poisson, il ne faudrait cependant pas se limiter à des séchoirs solaires. Il conviendra d'examiner et d'améliorer d'autres paramètres qui font partie intégrante du processus de séchage et qui contribuent réellement à faire diminuer les pertes. Ainsi, on aura avantage à améliorer les techniques de fermentation, de salage, d'emballage et d'entreposage ainsi qu'à accroître les conditions d'hygiène.

Remerciements -- L'auteur remercie de son aide financière le Commonwealth Science Council et la British Overseas Development Administration.

Bibliographie

- Curran, C.A. 1984. Report on a visit to The Gambia to investigate the reduction of losses in traditionally dried fisheries products. Tropical Development and Research Institute, Londres, R.-U. Report R1222 (L), 55 p.
- Doe, P.E. 1979. The polythene tent fish drier: a progress report. Communication présentée à la International Conference of Agricultural Engineering in National Development, tenue à l'Université Pertanian Malaisie, Serdang, Selangor, septembre 1979. Communication 79-12.
- Doe, P.E. et al. 1977. A polythene tent drier for improved sun-drying of fish. Food Technology. Australia, 29(11), 437-441.
- FAO (Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture). 1981. The prevention of losses in cured fish. FAO, Rome, Italie, Fisheries Technical Paper 219.
- N'Jai, A.E. 1985a. Fermenting and drying fish in The Gambia (considerations and possible impact of commercial solar drying in the artisanal fisheries sector). Ministère des Pêches, Banjul. FAO, Rome, Italie. Fisheries Report 329, Supplément, FIIUR329.
- _____ 1985b. Trials of a solar dome for fish drying. Ministère des Pêches, Banjul, Gambie. Publication 39.
- Trim, D.S., Curran, C.A. 1983. A comparative study of solar and sun drying of fish in Ecuador. Tropical Development and Research Institute, London, U.K. Rapport L 60, 44 p.
- Walker, D.I., Wood, C.D. 1985. Non-insecticidal methods of reducing losses caused by infestation of blowflies (Diptera) during fish curing procedures. FAO, Rome, Italie. Fisheries Report 329, Supplément FIIUR329.

CIRCULATION DE L'AIR DANS LES SÉCHOIRS SOLAIRES À CONVECTION NATURELLE

Herick Othieno¹

Résumé — Étant donné que le taux de séchage de tout produit repose sur l'humidité relative de l'air servant au séchage, un bon séchoir solaire doit réduire de manière importante l'humidité relative de l'air et, du même coup, engendrer un débit d'air élevé. Les séchoirs solaires à convection naturelle peuvent réduire considérablement l'humidité relative de l'air en chauffant celui-ci, mais beaucoup de séchoirs ne peuvent produire un débit d'air élevé. Le faible débit observé dans les séchoirs en a été la cause principale d'échec. Le présent document expose l'analyse du débit engendré par thermosiphon et propose une méthode d'accroître la circulation de l'air. L'analyse expérimentale a indiqué que l'on pouvait accroître le débit de l'air grâce à une cheminée de bonne conception. Toutefois, la pression engendrée par thermosiphon, cause de l'écoulement de l'air, doit correspondre à la chute de pression à travers le produit à sécher. Nous analyserons les problèmes et préciserons la taille que doit avoir un séchoir pour produire un débit d'air approprié.

Introduction

Au Kenya, plus de 80 % de toute la population habite les régions rurales où l'agriculture constitue l'activité dominante. Les fréquentes pénuries d'aliments observées dans ce pays proviennent soit de désastres naturels, soit de pertes excessives après la récolte en raison d'un mauvais entreposage. Pour accroître la sécurité des approvisionnements alimentaires, les agriculteurs doivent recourir à de meilleures techniques de production, de conditionnement, d'entreposage et de distribution des aliments. Cela leur permettra de s'approvisionner même pendant les saisons sèches.

Dans les pays tropicaux, l'une des méthodes de préservation des denrées alimentaires consiste à les déshydrater presque complètement avant l'entreposage. Il est pratiqué couramment chez les agriculteurs de faire sécher les cultures sur pied avant de les récolter. Cette méthode devient de moins en moins populaire, toutefois, étant donné la demande accrue de terres exercée par une population croissante. Qui plus est, Harris et Lindblad (1978) ont montré que les pertes au champ commençaient aussitôt la culture parvenue à maturité et qu'elles pouvaient s'étendre jusqu'à 25 % de la superficie dans les pays

1. Appropriate Technology Centre, Kenyatta University, Nairobi, Kenya.

tropicaux humides. Par conséquent, il ne faudrait pas laisser trop longtemps au champ une culture arrivée à maturité. Dans les régions à haut potentiel de rendement, les agriculteurs ensemencent deux fois les mêmes parcelles chaque année ce qui les oblige à récolter la première culture dès qu'elle parvient à maturité. La récolte est donc vendue immédiatement ou séchée et entreposée pour usage futur. Comme les fermes ne peuvent toutes sécher et entreposer leurs produits, elles ont besoin d'installations appropriées de séchage et d'entreposage d'un coût abordable.

Au Kenya, le gouvernement a mis de l'avant des programmes visant à accroître les importantes installations de stockage aux principaux magasins de l'État. Toutefois, l'effort pourrait ne pas améliorer sensiblement la situation si rien n'est fait au niveau de la ferme. Aussi, plusieurs chercheurs et organismes de développement rural ont commencé à s'attaquer aux problèmes qui se posent aux petits exploitants agricoles. Divers organismes et institutions ont donc introduit divers types de séchoirs solaires de récoltes et amélioré les techniques d'entreposage des céréales à la ferme.

Les travaux exposés dans la présente communication comptent parmi les mesures mises de l'avant pour assurer le séchage adéquat des récoltes acheminées aux entrepôts de l'État et de celles qui sont entreposées sur les fermes pour une longue période. Les essais ont eu lieu sur le terrain avec divers modèles de séchoir solaire et l'un d'eux (un séchoir solaire direct-indirect fonctionnant par convection naturelle) a été une réussite technique. Toutefois, la plupart des agriculteurs à qui ce séchoir était destiné hésitent encore à déboursier la somme nécessaire pour l'acquérir malgré ses nombreux avantages sur le séchage traditionnel à l'air libre.

Types de séchoirs

Il y a à l'heure actuelle un grand nombre de chercheurs qui participent à des projets de séchage solaire de récoltes. Cependant, l'une des principales contraintes tient au fait que les utilisateurs privés de ces séchoirs ne peuvent avoir facilement accès à l'électricité et aux autres formes d'énergie conventionnelle. Il faut donc concevoir les séchoirs pour qu'ils puissent fonctionner sans alimentation extérieure, c'est-à-dire que le fonctionnement doit reposer sur un phénomène naturel quelconque. Les séchoirs étudiés au Kenya fonctionnent pour la plupart par convection naturelle, une technique moins coûteuse mais aussi moins efficace que la convection forcée.

Le modèle de séchoir le plus simple est une claie recouverte de polyéthylène transparent qui permet aux rayons solaires d'atteindre le produit à sécher. La claie peut être construite à demeure sur le sol à l'aide de briques pressées ou de blocs de béton, ou ce peut être un modèle portatif en bois ou en tôle.

Le principe de fonctionnement de ce séchoir est simple : les rayons solaires traversent la couverture transparente pour être absorbés par le capteur qui, à son tour, réchauffe l'air à l'intérieur de l'enceinte. Comme l'air chauffé est moins dense que l'air ambiant, il peut s'échapper par les orifices pratiqués le long du périmètre (fig. 1). La faible pression produite aspire l'air ambiant à l'intérieur du séchoir par d'autres orifices aménagés sur les côtés,

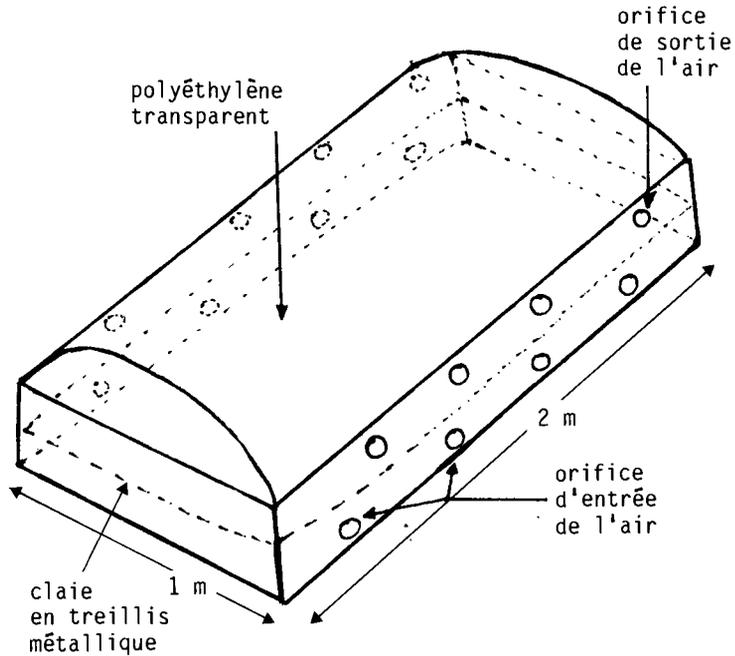


Fig. 1. Boîte de séchage solaire direct (de type claie).

tout juste sous la claie. Il y a donc circulation continue de l'air dans le séchoir.

Étant donné que l'air qui traverse le produit à sécher est à la température ambiante, il ne peut réchauffer le produit. Son rôle consiste à se charger de l'humidité du produit qui a été chauffé directement par les rayons solaires. De façon générale, la circulation de l'air dans le produit étant très faible, il se produit une saturation de l'air au-dessus de la claie et une condensation de vapeur d'eau sur la surface interne du polyéthylène. Au cours des expériences, on a pu observer que ce processus, qui restreignait naturellement les radiations solaires dans le séchoir, se produisait malgré une ventilation. McDowell (1973) a sensiblement amélioré ce type de séchoir qui avait été mis au point pour une gamme variée de récoltes tropicales. Certaines denrées alimentaires se dégradent au séchage à l'air libre en perdant des vitamines et des éléments nutritifs. La première amélioration a donc consisté à ajouter une couverture noire sous le polyéthylène pour empêcher les rayons solaires d'atteindre directement le produit. Par la suite, pour accroître le temps de séchage, on a essayé d'emmagasinier la chaleur, dans des galets peints en noir placés à la base du séchoir. Ces techniques n'ont pas amélioré l'efficacité de séchage de l'appareil puisque la masse d'air en circulation est toujours demeurée faible.

Au Kenya, Wright et Waddle, qui travaillaient au Collège d'agriculture Egerton à la fin des années 70, ont apporté d'autres modifications à la boîte de séchage afin d'éviter le blanchiment des légumes et d'accroître l'efficacité du séchoir. Ils ont divisé la boîte rectangulaire en deux chambres, l'une servant à réchauffer l'air

et l'autre à sécher le produit. Ils ont placé du polyéthylène transparent sur la chambre de réchauffement afin de permettre aux rayons solaires de réchauffer l'air. Ils ont également placé du polyéthylène noir au fond de la chambre pour absorber la chaleur et bloquer l'humidité du sol. Une autre pellicule de polyéthylène noir a aussi été étendue sur la chambre de séchage pour éviter le blanchiment des produits. On n'avait pratiqué aucun orifice de ventilation sur les côtés, mais une ouverture sur le devant permettait à l'air ambiant d'entrer dans la chambre de chauffage tandis qu'une autre à l'arrière de la chambre de séchage laissait échapper l'air humide (fig. 2). Ainsi, les rayons solaires traversant le polyéthylène transparent de la chambre réchauffent l'air qui, par convection naturelle, est acheminé dans la chambre de séchage où il se charge de l'humidité du produit, lorsqu'il le traverse, pour ensuite s'échapper par l'ouverture à l'arrière de la boîte. Ce séchoir pourrait également servir à sécher directement les récoltes non blanchies si on les place directement dans la chambre de séchage. Dans les deux systèmes, le débit de l'air est très faible et, ici encore, les améliorations n'ont pas augmenté sensiblement le rendement du séchoir.

À mesure que se sont poursuivis les essais pour améliorer le rendement des séchoirs à convection naturelle, Othieno et al. (1981), suite au succès du séchoir solaire de riz examiné par Excell (1980), ont mis au point un séchoir solaire indirect pourvu d'une cheminée et orienté de manière à accroître la circulation d'air par convection dans l'appareil. Toutes les études, à la fois théoriques et expérimentales, ainsi que les essais sur place, ont eu lieu au Kenya. Ce programme avait comme objectif global de concevoir de petits séchoirs solaires à convection naturelle devant être utilisés plus

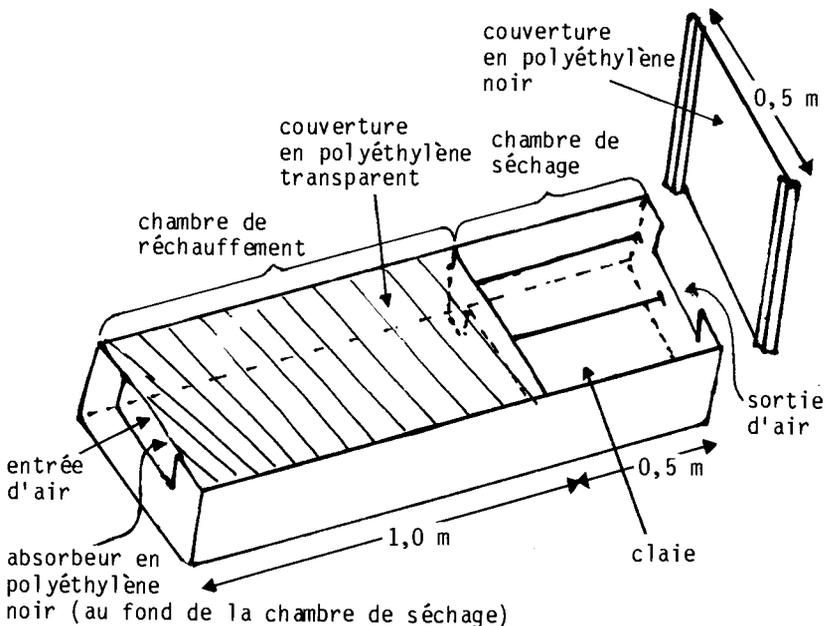


Fig. 2. Modèle portable d'un séchoir solaire indirect.

particulièrement au Kenya afin de réduire d'environ 20 % à 13 % la teneur en eau (à l'état humide) du maïs épluché. Le séchoir montré à la figure 3 est de type indirect; il comprend un réchauffeur d'air, une enceinte opaque pour le produit et enfin une cheminée. Le réchauffeur, constitué d'une vitre et d'une tôle absorbante noire, a été disposé à un angle d'environ 20° par rapport à l'horizontale pour faciliter l'élévation de l'air réchauffé. Sous les tropiques, les capteurs trop inclinés ne reçoivent pas assez d'énergie solaire pour réchauffer l'air à la température exigée. Par conséquent, on doit utiliser une cheminée avec les séchoirs à convection naturelle. L'énergie supplémentaire qui se trouve à la base de la cheminée améliore de beaucoup le fonctionnement du séchoir en augmentant le débit de l'air dans la masse de céréales à sécher. À l'intérieur de l'enceinte opaque se trouvait une claie recouverte d'un fin treillis métallique destinée à recevoir environ 100 kg de maïs. On avait posé une cheminée au-dessus de l'enceinte pour activer la circulation de l'air vers le haut.

Les rayons solaires traversent la vitre transparente et réchauffent la chambre qui, à son tour, réchauffe l'air. Cet air réchauffé s'élève par convection naturelle dans l'enceinte contenant de la boîte de séchage horizontale. Cependant, le séchage n'est pas uniforme : la couche inférieure des grains sèche très rapidement alors que celle du haut demeure humide pendant une plus longue période. Le phénomène s'explique par un débit d'air insuffisant dans la masse à sécher. Ainsi, lorsque l'air chaud parvient au haut de la masse à

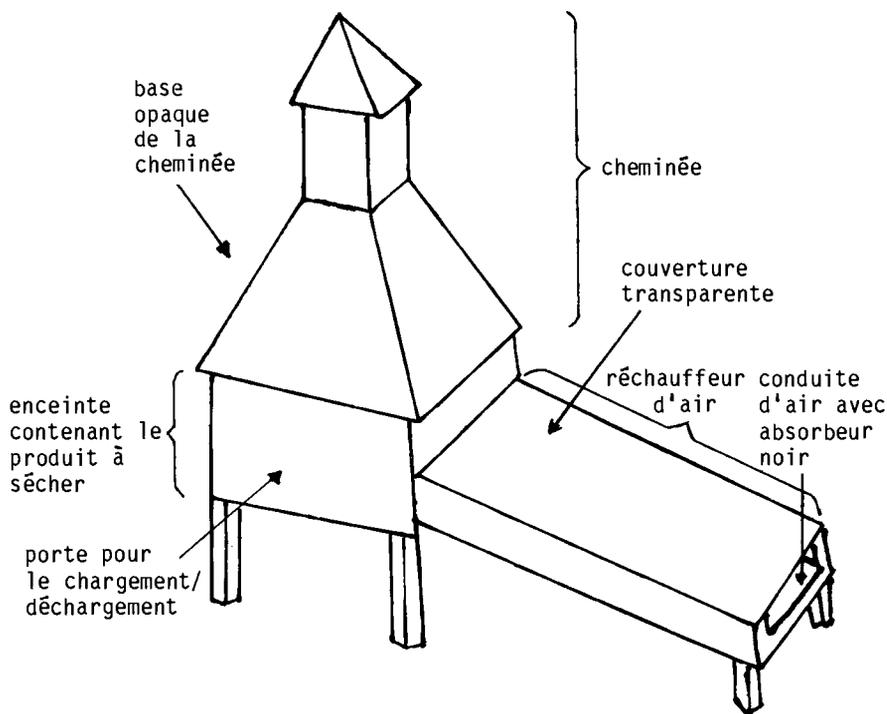


Fig. 3. Séchoir solaire indirect à convection naturelle.

sécher, il est déjà saturé d'eau et donc incapable d'en absorber d'autre. On a proposé deux méthodes pour remédier à cette situation : mélanger à la main le produit au moins deux fois par jour ou réchauffer l'air au-dessus du tas de grains.

La première méthode nécessite un préposé à proximité. La situation n'est pas intéressante puisque l'un des buts du séchoir est d'éliminer la main-d'oeuvre exigée habituellement dans un séchage à l'air libre. En outre, lorsqu'on ouvre le séchoir pour mélanger le produit, il se produit une perte de chaleur qui diminue temporairement le taux de séchage.

Ces raisons expliquent le choix de la deuxième option (Othieno, 1986). On a donc modifié la base de la cheminée en remplaçant par du verre les parois est et ouest afin de permettre aux rayons solaires de chauffer directement le dessus de la masse de céréales. Grâce à cette modification, le séchoir indirect est devenu un séchoir combiné direct-indirect. Cependant, on ne peut l'utiliser que pour sécher des récoltes qui n'ont pas subi de blanchiment ni aucune autre forme de dégradation provoquée par un ensoleillement direct. Si l'on place des tôles peintes en noir derrière les fenêtres, celles-ci jouent également un rôle de capteur solaire et tout le système devient un séchoir solaire indirect amélioré. Ce dernier modèle présente la même structure qu'à la figure 3 mais son efficacité est supérieure à celle des premiers prototypes signalée par Grainger et al. (1981) et Othieno et al. (1981).

En 1985, le Département des sciences de l'alimentation et de la technologie au Collège d'agriculture et de médecine vétérinaire de l'Université de Nairobi a fait venir de Suisse un petit séchoir solaire de récoltes. Ce séchoir de type indirect fonctionne à la fois par convection naturelle et forcée. Au haut de la cheminée se trouve un ventilateur mû par le vent qui aspire l'air hors du séchoir. Lorsque le temps est très inclément, on peut réchauffer l'air à l'aide d'un brûleur à gaz installé au bas d'un deuxième distributeur d'air (fig. 4). On a disposé à l'intérieur du bac de séchage quatre claies dont la base en treillis métallique permet à l'air de traverser les légumes. Les claies mesurent chacune 0,5 m de largeur, 0,75 m de longueur et 0,05 m de profondeur. Ce séchoir a donc une capacité semblable à celui de la figure 3. On n'a pas encore comparé le rendement de ce séchoir avec le dernier modèle conçu par Othieno (1986).

Rendement comparé des séchoirs

On a comparé le rendement du séchoir solaire indirect à convection naturelle (fig. 3) à celui du séchoir amélioré qui comportait deux capteurs supplémentaires à la base de la cheminée (fig. 4). Les deux séchoirs avaient la même configuration et taille. Voici les dimensions des séchoirs :

Capteur -- 1 m de largeur, 2 m de longueur et 0,05 m de profondeur (espace d'air entre la vitre et la plaque absorbante peinte en noir). La plaque était du contre-plaqué peint en noir, bois bon marché que l'on peut facilement acheter au Kenya.

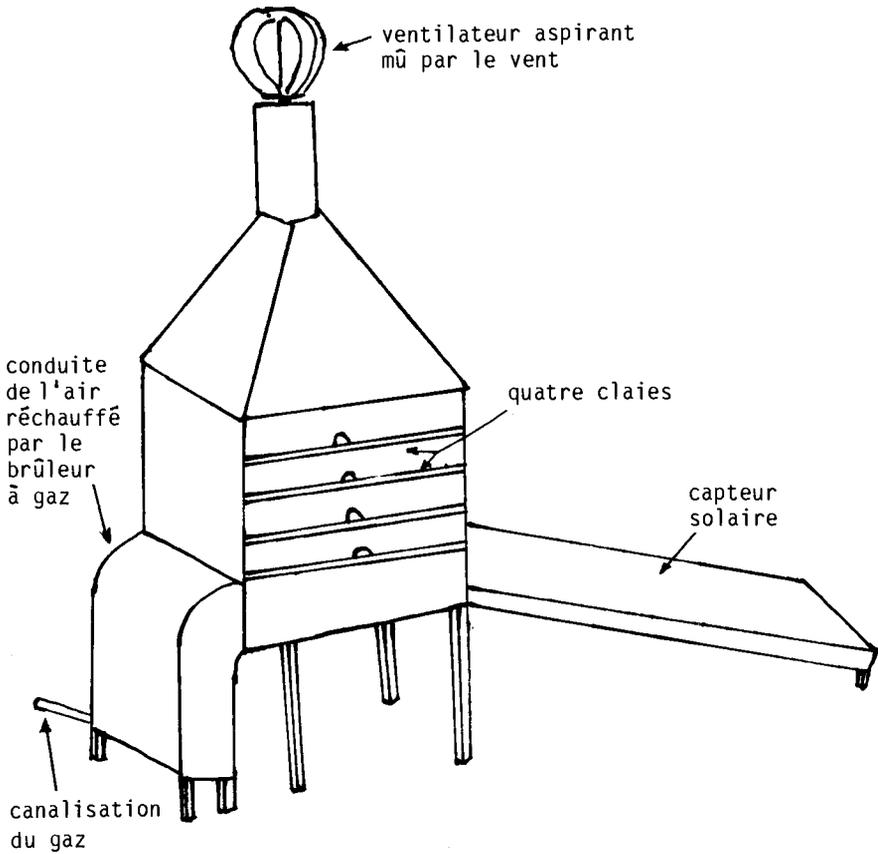


Fig. 4. Séchoir solaire de légumes équipé d'un réchauffeur à gaz auxiliaire (capacité de 85 kg sur les quatre claies).

- Bac de séchage -- surface intérieure de 1 m sur 1 m, renferme deux claies avec treillis métallique de 0,05 m de profondeur; les parois intérieures sont faites de contre-plaqué.
- Cheminée -- section de 0,2 m, 0,2 m et 0,5 m de hauteur; la base et les côtés de la cheminée sont inclinés vers le centre à un angle de 45°.

La hauteur totale du séchoir à partir du sol jusqu'à l'extrémité de la cheminée s'établissait à 2 m, ce qui comprenait l'ensemble cheminée, le bac de séchage (0,4 m de profondeur) et les pieds du séchoir (0,6 m de hauteur). Outre la cheminée, on a isolé les bacs de séchage et les capteurs afin de réduire les pertes de chaleur par conduction. Les deux capteurs étaient inclinés à 15° par rapport à l'horizontale.

Chargés chacun d'un mélange de 100 kg de maïs ayant une teneur initiale en eau de 19 % (à l'état humide), les deux séchoirs ont été placés à 3 m l'un de l'autre pour éviter qu'ils ne se fassent ombrage. On avait déposé dans chaque claie 50 kg de maïs sur une

épaisseur de 0,05 m, c'est-à-dire une épaisseur totale de 0,1 m de céréales dans chaque séchoir. À l'aide d'un hygromètre Marconi modèle TF 933C, on a mesuré simultanément la teneur en eau dans chacune des claies des séchoirs à des intervalles égaux. On a également relevé la température de l'air à la sortie de chaque capteur ainsi que la température de l'air à l'intérieur de la base de la cheminée à l'aide de thermocouples en cuivre/constantan SWG 40 branchés à un enregistreur de données Solartron (modèle 3430B).

On avait supposé que le rayonnement solaire serait le même pour les deux séchoirs. On a effectué trois cycles comparatifs en novembre 1985 pendant des journées généralement ensoleillées et sans nuage. Les résultats nous ont révélé que le séchoir solaire indirect doté de capteurs supplémentaires à la base de la cheminée affichait une plus grande efficacité que le séchoir régulier indirect. Les figures 5 et 6 donnent certaines des mesures effectuées. On a également comparé le débit massique d'air dans les séchoirs (fig. 7), qui a confirmé que le réchauffement de l'air à la base de la cheminée accroissait la circulation de l'air et augmentait l'efficacité du séchage. L'écart entre les températures de l'air de sortie des deux capteurs traduit aussi le même phénomène; une circulation d'air plus forte diminuera la température de l'air de sortie du capteur et accélérera le taux de séchage. Les mesures du débit d'air ont été prises à l'intérieur des cheminées à l'aide d'un anémomètre Prosser (modèle AVM 502) et sont données directement (en m/s) étant donné que la section des deux cheminées était identique.

Circulation de l'air dans les séchoirs à convection naturelle

Plusieurs facteurs jouent un rôle important dans le processus de séchage. Parmi les principaux, mentionnons le débit d'air, la superficie disponible, la température de l'air et l'humidité et enfin la teneur en eau et la porosité du produit à sécher. Outre la teneur en eau et le genre de produit à sécher, les séchoirs solaires simples peuvent influencer sur les autres facteurs. En d'autres mots, en réchauffant l'air, on peut obtenir l'humidité relative et la température désirées pour effectuer le séchage.

La vitesse de l'air, qui est sans doute l'un des facteurs les plus importants, n'est pas assez élevée dans les séchoirs solaires à convection naturelle. C'est d'ailleurs l'une de leurs principales lacunes à l'heure actuelle. Par conséquent, pour mettre au point un séchoir solaire à convection naturelle qui "fonctionne", il est très important de connaître les facteurs qui influent sur la circulation de l'air engendrée par thermosiphon dans le séchoir. Othieno (1985a) a analysé la vitesse de l'air par thermosiphon ainsi que la hauteur de la pression par rapport à la pression atmosphérique et il a constaté que la pression par thermosiphon donnant lieu à la circulation de l'air dans le séchoir était égale à :

$$\Delta P = (\rho_o - \bar{\rho}_a)gH \quad [1]$$

où ρ_o est la densité de l'air ambiant, $\bar{\rho}_a$ est la densité moyenne de l'air à l'intérieur du réchauffeur d'air, g est l'accélération gravitationnelle et H est la hauteur verticale du réchauffeur d'air.

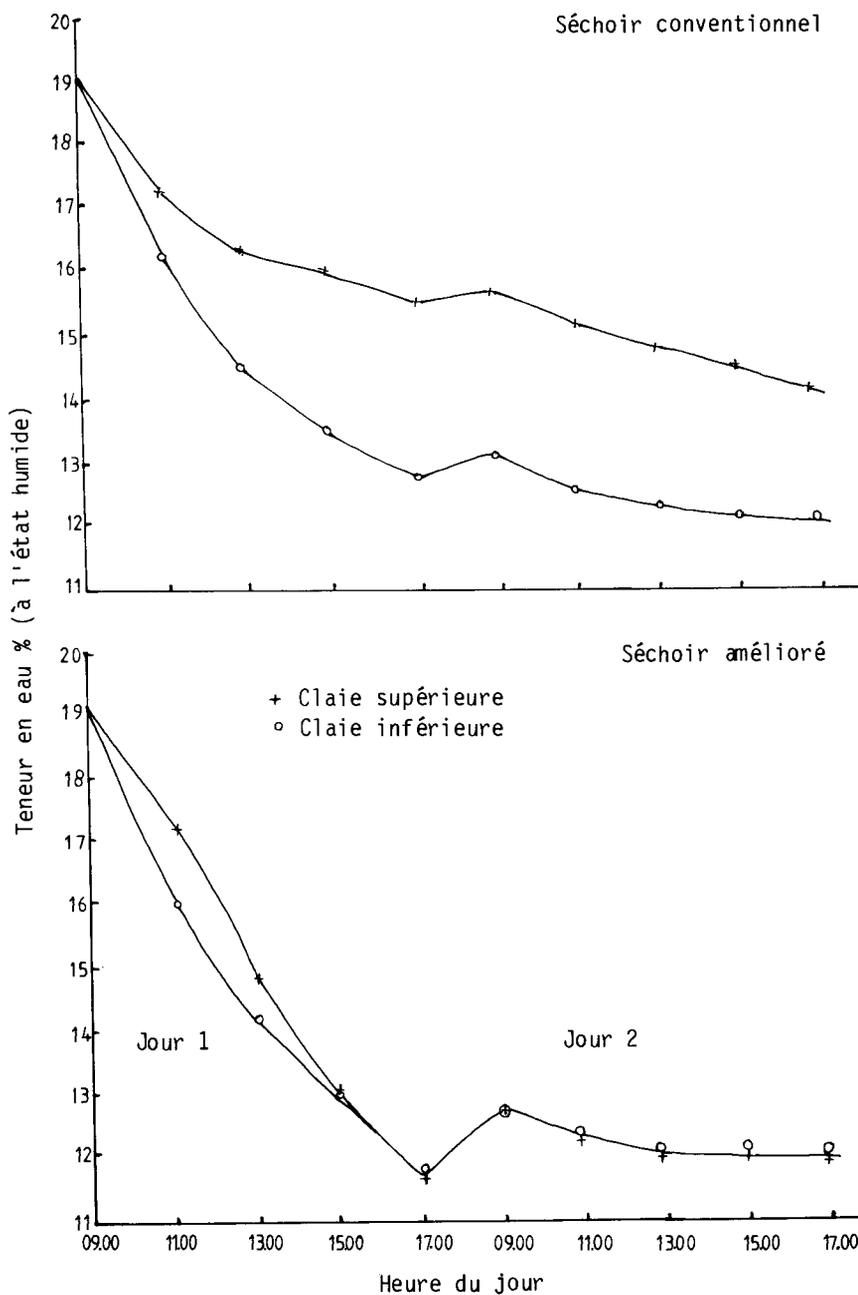


Fig. 5. Schéma de séchage du maïs à l'aide d'un séchoir solaire indirect conventionnel et d'un séchoir solaire amélioré doté de capteurs supplémentaires à la base de la cheminée. Le grain n'a pas été remué ni enlevé du séchoir pendant tout le cycle.

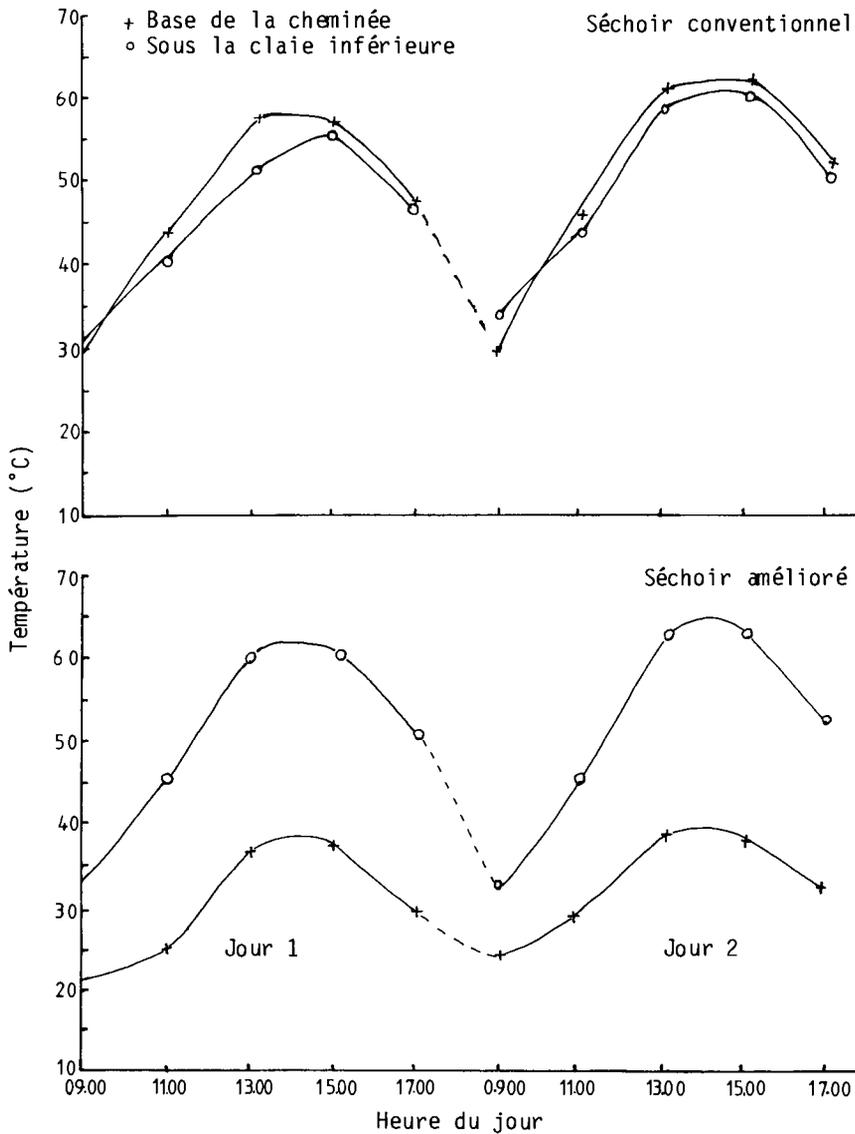


Fig. 6. Températures de l'air dans un séchoir solaire indirect conventionnel et dans un séchoir amélioré doté de capteurs supplémentaires à la base de la cheminée.

À mesure que l'air circule dans le séchoir, sa pression décroît à cause de la friction sur les parois et change de direction dans le séchoir. On a observé que la pression dynamique due à la vitesse de l'air était très petite et pouvait donc être omise. La chute de pression la plus importante dans le système, qui influe de façon marquée sur le rendement du séchoir, se produit à l'intérieur de la masse de céréales. Beaucoup de chercheurs ont déterminé par des

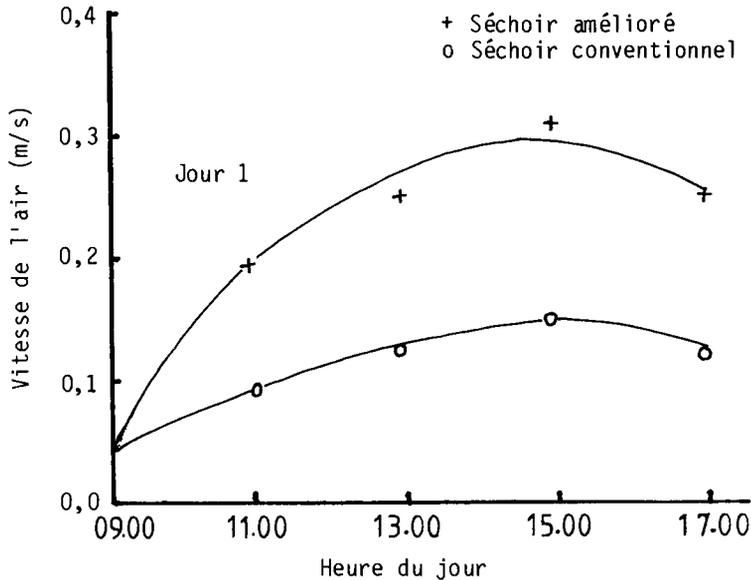


Fig. 7. Vitesse de l'air dans la cheminée des deux séchoirs.

expériences l'ampleur de cette chute de pression pour différentes cultures et on peut l'estimer à partir des données fournies par Shedd (1953) :

$$\Delta P_x = K(U_g)d_g \quad [2]$$

où d_g est l'épaisseur de la masse de céréales et $K(U_g)$ est la chute de pression par couche unitaire de céréales et elle repose sur la vitesse de l'air U_g . Lorsque U_g est égal à zéro, la valeur de K doit également être zéro.

À partir de l'équation 1, il est clair que les séchoirs solaires à convection naturelle doivent avoir une enceinte de réchauffement importante, H , si l'on veut que les réchauffeurs produisent une différence de pression notable. Cela signifie non seulement que le réchauffeur doit être incliné par rapport à l'horizontale, mais aussi qu'il doit être d'une longueur appréciable pour présenter une valeur H correspondante. À partir de cette analyse, on ne devrait pas s'attendre à ce que les séchoirs installés à l'horizontale (ou presque) et sans cheminée fonctionnent bien.

Discussion et conclusion

Ces séchoirs comportent plusieurs avantages par rapport à la méthode traditionnelle d'étalement du produit à l'air libre. On connaît bien maintenant ces avantages (Othieno, 1985b) et les séchoirs ne sont pas trop coûteux. Le modèle de 1986 d'Othieno, que l'on dit dispendieux, coûte environ 250 \$ US mais ceux qui seront construits pour les agriculteurs seront d'un coût moins élevé. Par conséquent, il faudra s'attendre à une forte demande pour ce type de séchoir,

surtout lorsqu'on connaît les graves pénuries saisonnières d'aliments au Kenya.

La situation est toutefois différente. Les agriculteurs ne sont pas disposés à acheter les séchoirs. Cela pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs comme le sous-emploi (ou le chômage) dans les régions rurales des pays en développement et aussi par le fait que le séchage traditionnel à l'air libre est tout à fait gratuit. L'énergie solaire est gratuite et on peut toujours trouver dans les régions rurales un coin de terre pour étaler les produits. Par conséquent, les agriculteurs ne reconnaissent pas les avantages du séchoir solaire.

Le séchage a pour but principal de réduire la teneur en eau d'une denrée de façon à pouvoir l'entreposer pour un usage futur sans qu'il soit nécessaire de la réfrigérer puisque, comme on le sait bien, les aliments séchés peuvent être stockés en toute sécurité pendant de longues périodes. Pour cette raison, le gouvernement du Kenya a consacré de larges sommes à l'importation de gros séchoirs au mazout pour sécher les produits agricoles qu'il exporte ou qu'il destine à la consommation locale. Quelques-uns de ces séchoirs sont en exploitation aux dépôts de l'Office national des céréales et des produits. (Un de ces dépôts a dépensé environ 3 000 \$ US en mazout pour exploiter le séchoir pendant une saison sèche.) Si l'Office avait séché jusqu'à la teneur en eau nécessaire (c.-à-d. moins de 13,5 % à l'état humide) toutes les céréales des agriculteurs, le gouvernement aurait pu économiser ses devises dont il a tellement besoin. Or, comme l'agriculteur individuel ne comprend pas la situation, il importe que les gouvernements des pays en développement apportent leur contribution non seulement en veillant à l'éducation des agriculteurs, mais aussi en aidant les chercheurs à diffuser les nouveaux progrès techniques. De toute évidence, les séchoirs solaires à convection naturelle constituent déjà une prouesse technique puisqu'ils sont en mesure d'élever les températures de l'air et, partant, de réduire l'humidité relative afin d'accroître le taux de séchage. Qui plus est, les températures élevées à l'intérieur des séchoirs découragent les infestations par les insectes et les moisissures : le produit final est donc d'une qualité supérieure. Pourquoi les agriculteurs n'acceptent-ils donc pas d'emblée ces séchoirs comme nécessaires dans leur exploitation?

Parce que les séchoirs sont utilisés uniquement de façon intermittente, les agriculteurs ne considèrent pas l'achat comme particulièrement intéressant. En outre, à cause de leur taille, la plupart des séchoirs ont des applications limitées et le séchage ne s'effectue que pendant une courte période de l'année. On recommande donc de mettre au point et d'éprouver des séchoirs solaires polyvalents. Quelques-uns de ces nouveaux séchoirs devraient pouvoir servir comme entrepôt lorsqu'il n'y a rien à sécher. On peut également associer l'absence de la demande des séchoirs actuels au fait que la plupart des chercheurs tendent à délaissier la contribution de l'utilisateur final pendant l'étape de R&D. En outre, plusieurs chercheurs de pays en développement ont tendance à travailler en vase clos, ignorant le rôle des autres scientifiques, comme les spécialistes de l'alimentation et les nutritionnistes dans ce cas. Pour que cette technique se répande, elle doit être mise au point par une équipe multidisciplinaire qui tiendra compte des besoins des agriculteurs.

Remerciements - L'auteur remercie de son aide financière le Commonwealth Science Council et la British Overseas Development Administration.

Bibliographie

- Excell, R.H.B. 1980. A simple rice dryer: basic design theory. *Sunworld*, 4(6), 186-191.
- Grainger, W., Othieno, H., Twidell, J.W. 1981. Small scale solar crop dryer for tropical village use -- theory and practical experience. In Hall, D.O., Morton, J., éd. *Solar technologies in the eighties (Vol. 2) : proceedings of the International Solar Energy Society's Solar World Forum*, Brighton. Pergamon Press, Oxford, R.-U., p. 989-996.
- Harris, K.L., Lindblad, C.J. 1978. Postharvest grain loss assessment methods. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, É.-U.
- McDowell, J. 1973. Solar drying of crops and foods in humid tropical climates. Caribbean Food and Nutrition Institute, Kingston, Jamaica. Report CFNI-T-7-73.
- Othieno, H. 1985a. Design factors of small scale thermosyphon solar crop dryers. In Awe, O., éd., *Proceedings of African Union of Physics Conference*. Ibadan, Nigéria, p. 135-143.
- _____ 1985b. Optimization of solair air heating collectors used for crop drying. In *Renewable energy developments in Africa: Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa*, Mauritius, 25 March-1 April 1985 (Vol. II). Commonwealth Science Council, Londres, R.-U.
- _____ 1986. A comparative study of natural circulation solar maize dryers in Kenya. In *Proceedings of the International Conference on Energy, Food Production and Postharvest Technology*, Nairobi, Kenya.
- Othieno, H., Grainger, W., Twidell, J.W. 1981. Application of small scale solar crop dryers to maize drying in Kenya. In Twidell, J.W., éd., *Energy for Rural and Island Communities (Vol. II)*. Pergamon Press, Oxford, R.-U., p. 377-386.
- Shedd, C.K. 1953. Resistance of grains and seeds to air flow. *Agricultural Engineering*, 34, 616-619.
- Wright, C.A., Waddle, D. [1970 s.d.]. A portable indirect solar dryer. Report for The South-East Consortium for International Development, Egerton College, Nakuru Press, Nairobi, Kenya, p. 1-18.

RECHERCHE SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE APPLIQUÉE AU SÉCHAGE DES RÉCOLTES AU KENYA

F.B. Sebbowa¹

Résumé — On présente ici quelques-unes des cultures du Kenya qui peuvent, de façon générale, être séchées dans un séchoir solaire. En se servant de la méthode de conception et d'essai du séchoir solaire de pyrèthre comme exemple, nous avons indiqué le genre de données disponibles sur l'insolation, les autres détails pertinents nécessaires au niveau de la conception et le rendement probable dans une grande région à vocation principalement agricole du Kenya. De façon plus particulière, notre modèle nous révèle que, pour la saison des pluies (environ 30 % de la campagne agricole du pyrèthre), il faut faire appel à une source d'énergie d'appoint pour les produits récoltés pendant cette période puisqu'ils doivent être séchés sans tarder pour éviter que leur qualité ne se dégrade. Le présent document expose les modifications qui s'imposent pour offrir ce type d'énergie d'appoint. De même, nous illustrons quelques-uns des principaux obstacles socio-économiques qui sont susceptibles de nuire à la popularité de ce genre de séchoir chez les utilisateurs finals prévus. En dernier lieu, nous faisons ressortir certaines des contraintes générales d'ordre techno-socioéconomique qu'il conviendrait d'éliminer pour accélérer le progrès dans la recherche sur les séchoirs solaires de récoltes, par exemple une piètre méthodologie de recherche et un mauvais échange de technologie, contraintes qui touchent le Kenya de façon particulière et l'Afrique de manière générale.

Exigences du séchage des produits agricoles au Kenya

Le Kenya est situé entre le 3° de latitude sud et le 4° de latitude nord, d'une part, et le 35° de longitude et le 41° de longitude est, d'autre part. Le pays présente un relief dont l'altitude passe du niveau de la mer, dans la partie sud-est, à 3 000 m au-dessus du niveau de la mer, dans les plissements de la Rift Valley de l'Afrique de l'Est, dans ses régions centrale et occidentale. Le Kenya produit plusieurs cultures équatoriales et tropicales, notamment : café, thé, maïs, pyrèthre, tabac, fèves, mangue, noix de coco et assortiment de fleurs. Ces produits doivent pour la plupart être séchés soit avant leur entreposage, soit pendant leur conditionnement jusqu'au stade final. Au Kenya, l'insolation annuelle moyenne s'élève à environ 0,7 kW/m² tandis que la période moyenne d'ensoleillement est de 7 heures par jour sur une base

1. Département de génie mécanique, Université de Nairobi, Nairobi, Kenya.

annuelle. Il y a donc un potentiel énorme pour répondre à quelques-uns des besoins de séchage des récoltes à l'aide de l'énergie solaire.

Toutefois, les fluctuations régionales de l'insolation, le niveau élevé de l'humidité relative (HR) (à l'échelle nationale, la moyenne annuelle de l'HR s'établit à 70 %) et l'apparition des pluies (la pluviométrie annuelle moyenne est de 800 mm au pays) au moment de la période de récolte restreint le nombre de cultures qui peuvent être mises en séchoir dans une région donnée au Kenya. En outre, certaines cultures (tableau 1) nécessitent un séchage rapide pour éviter une perte de qualité.

À l'échelle du pays, la plupart des agriculteurs de subsistance sèchent leurs récoltes à l'air libre. Cependant, des coopératives et des agriculteurs commerciaux ont mis à l'essai divers séchoirs mécaniques avec de plus en plus de succès. Pour remplacer les séchoirs inefficaces, on a effectué des recherches intensives sur les séchoirs solaires : récemment, on s'est attaché de façon particulièrement marquée aux séchoirs solaires pour le maïs (Othieno, 1985), le café (Trim et Brenndorfer, 1985) et le pyrèthre (Sebbowa, 1985).

Les séchoirs de récoltes au Kenya : étude du pyrèthre

Cette étude du pyrèthre au Kenya vise à faire ressortir quelques-unes des raisons techno-socio-économiques qui ont nuí à la popularité des séchoirs solaires au Kenya et peut-être dans d'autres pays en développement. Chaque année, le Kenya produit en moyenne 40 000 t de pyrèthre humide dans la région indiquée à la figure 1. Ce produit intervient pour plus de 80 % de la demande mondiale de cette base importante "d'insecticides sécuritaires". Toutefois, comme cette culture est normalement récoltée lorsque le niveau d'humidité dépasse 70 % (à l'état humide), elle doit subir un séchage pour ramener l'état humide à moins de 40 % dans les 48 premières heures et à environ 13 % à 10 % dans les 12 heures qui suivent pour assurer un entreposage et un traitement adéquats. Les recherches doivent donc se poursuivre pour trouver un séchoir efficace si l'on veut diminuer le coût d'évaporation de cette grande quantité d'eau du pyrèthre.

Évolution des séchoirs de récoltes au Kenya

Séchage à l'air libre

À l'exception du thé et du tabac, toutes les récoltes du Kenya qui doivent être séchées pourraient tout simplement l'être par la méthode traditionnelle à l'air libre. Il s'agit alors d'étaler la récolte sur le sol ou sur un support quelconque, par exemple des sacs ou un treillis métallique, qui est souvent surélevé. De fait, près de 55 % du pyrèthre au Kenya est séché de cette façon par les petits agriculteurs. Il se produit des pertes et une contamination et la récolte nécessite une main-d'oeuvre nombreuse. Chez les agriculteurs qui pratiquent une culture abondante, l'espace de séchage a souvent pris des proportions imposantes. Qui plus est, le taux de séchage à l'air libre de certaines récoltes est beaucoup trop lent et pourrait les faire pourrir. Il a toujours été nécessaire de recourir à un séchoir mécanique pour une production de pyrèthre supérieure à 500 kg (à l'état humide/semaine).

Tableau 1. Récoltes pouvant se prêter au séchage solaire au Kenya.

	Café	Maïs	Thé	Pyrèthre
Quantité (kt/année)	140	120	81	9
Teneur en eau (en %, à l'état humide)				
Sur base humide	55	22	74	70
Sur base sèche	11	13	4	15
Temps optimal de séchage (en heures)	NEa	NE	12	48
Période de récolte (principale) ^b	Avril-mai	Août-oct.	Août-oct.	Sept.-nov.
Précipitations pendant la récolte (mm/mois)	149	94	94	92
Humidité relative (%)	79	78	78	76
Insolation globale (MJ/m ² par jour)	9,9	8,3	8,3	9,1
Heures d'ensoleillement (heures/jour)	7	6	6	7
Température ambiante maximum (°C)	25	24	24	24

a NE = non essentiel.

b Certaines cultures sont produites sous irrigation toute l'année.

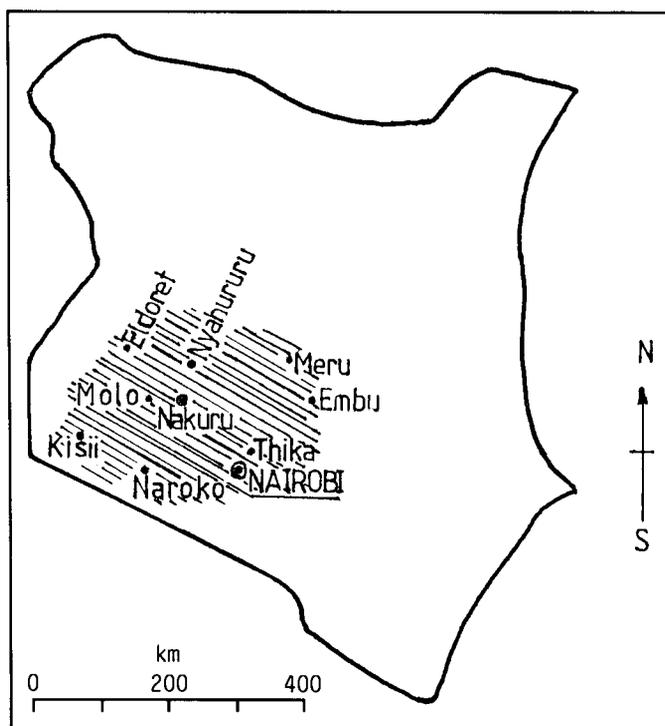


Fig. 1. Principale région de culture du pyrèthre au Kenya.

Séchoirs de pyrèthre alimentés au mazout

Les séchoirs de pyrèthre à mazout (fig. 2) ont eu une très grande popularité jusqu'au début des années 70. Ces séchoirs étaient très rapides et efficaces puisqu'on pouvait contrôler la source de chaleur, et partant l'entrée de chaleur, et qu'on disposait d'un ventilateur mécanique. Toutefois, la hausse vertigineuse des prix du pétrole, parmi les principales raisons, a relégué depuis un bon moment les séchoirs à mazout hors de portée des agriculteurs de pyrèthre.

Séchoirs de pyrèthre alimentés au bois

Quelques variations du séchoir à bois (fig. 3) ont remplacé les séchoirs à mazout. Bien que les séchoirs à bois soient un appareil populaire et courant sur les fermes de pyrèthre du Kenya, la faiblesse croissante des réserves forestières nationales, leur principale source d'approvisionnement, menace à l'heure actuelle ce genre de séchoir. Le prix du bois de feu, à cause de sa rareté dans certaines régions, s'avère déjà un fardeau assez lourd pour quelques agriculteurs. D'autres frais d'exploitation, comme le remplacement régulier des tuyaux de cheminée, et le danger constant d'incendie, font tous ressortir le besoin d'effectuer une recherche sur d'autres types de séchoir. Dans quelques cas, des agriculteurs ont utilisé des séchoirs

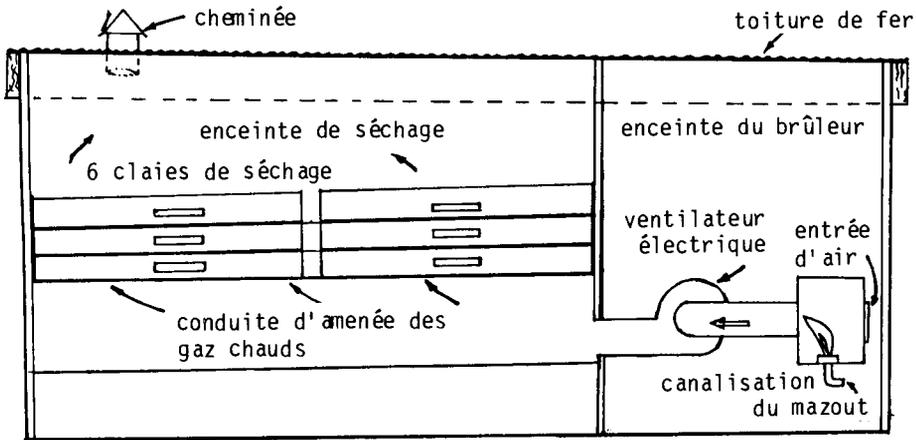


Fig. 2. Séchoir de pyrèthre à mazout -- capacité de 500 kg (à l'état humide), temps de séchage : 24 heures.

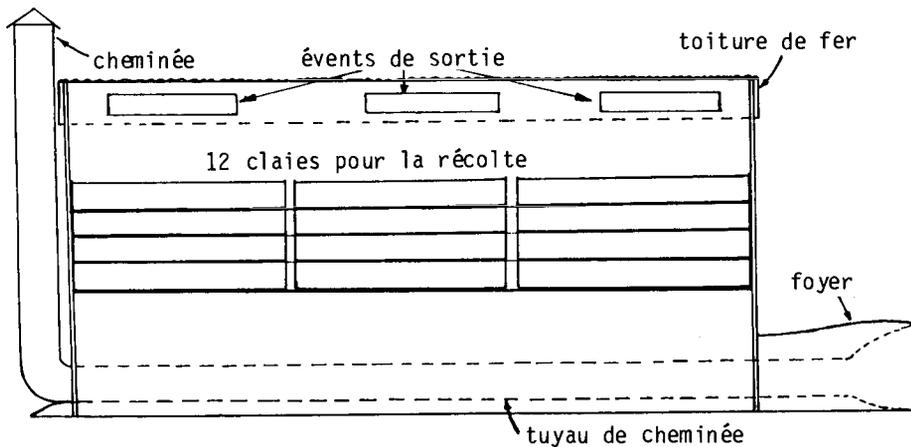


Fig. 3. Séchoir de pyrèthre à bois -- capacité de 300 à 500 kg (à l'état humide), temps de séchage : 24 à 36 heures.

à charbon. Toutefois, ceux-ci comportent à peu près les mêmes lacunes que les séchoirs au bois et leur usage ne s'est pas généralisé au Kenya.

Séchoirs à convection naturelle

L'Office du pyrèthre du Kenya (OPK) et l'Université de Nairobi (UDN) ont tous les deux étudié divers séchoirs solaires à convection naturelle et séchoirs directs d'appoint (fig. 4). L'UDN a étudié un modèle (fig. 5) pouvant être modifié pour accepter un système à convection forcée (celui-ci sera décrit plus tard). Dans les deux

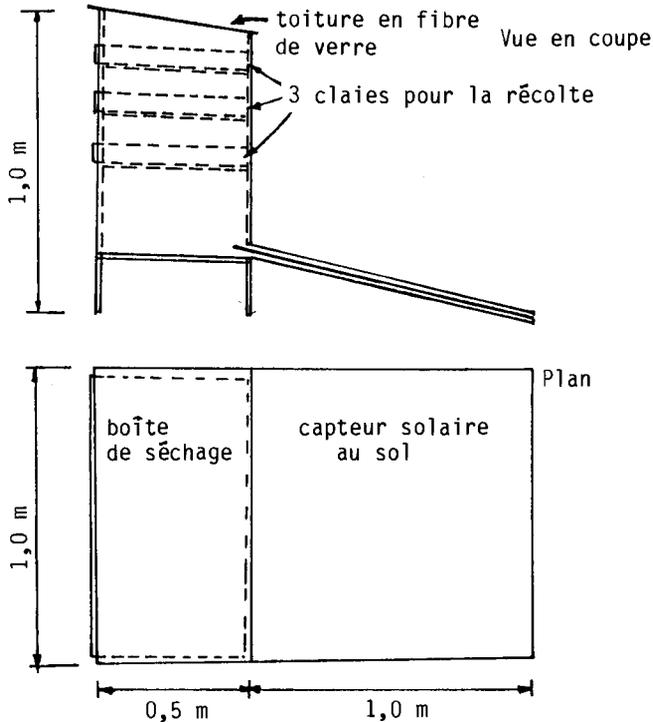


Fig. 4. Séchoir solaire de pyrèthre à convection naturelle -- capacité de 40 kg (à l'état humide), temps de séchage : 30 à 50 heures. À cause de sa faible capacité et de son taux de séchage peu élevé, ce séchoir n'a pas été adopté.

cas, les essais ont révélé un séchage incomplet, surtout pendant les mois pluvieux, qui tombent au beau milieu de la récolte du pyrèthre au Kenya (fig. 6). À cet égard, on espérait que le modèle tanzanien signalé pour la première fois en 1984 (Mrema, 1984) apporterait quelques réponses au problème. Au Kenya, du moins à l'UDN, les chercheurs ont surtout opté pour les séchoirs solaires à convection forcée.

Séchoir solaire de pyrèthre à convection forcée

Données de référence sur le modèle

Après avoir précisé la ou les récoltes d'intérêt, dans notre cas le pyrèthre, et les régions de production (fig. 1), il faut ensuite déterminer avec précision l'insolation moyenne, la durée d'ensoleillement en heures, la température extérieure maximum, l'humidité relative et les précipitations de pluie (tableau 2). Toutefois, il est également important d'établir ces paramètres par rapport à la période de séchage (fig. 6). Les "moyennes de la région globale" du tableau 2 ne diffèrent pas beaucoup des valeurs nationales moyennes sauf en ce qui touche l'humidité relative et la distribution annuelle des précipitations (ces données sont présentées à la figure 6 en moyenne mensuelle pour toute l'année). Le taux moyen de livraison de pyrèthre

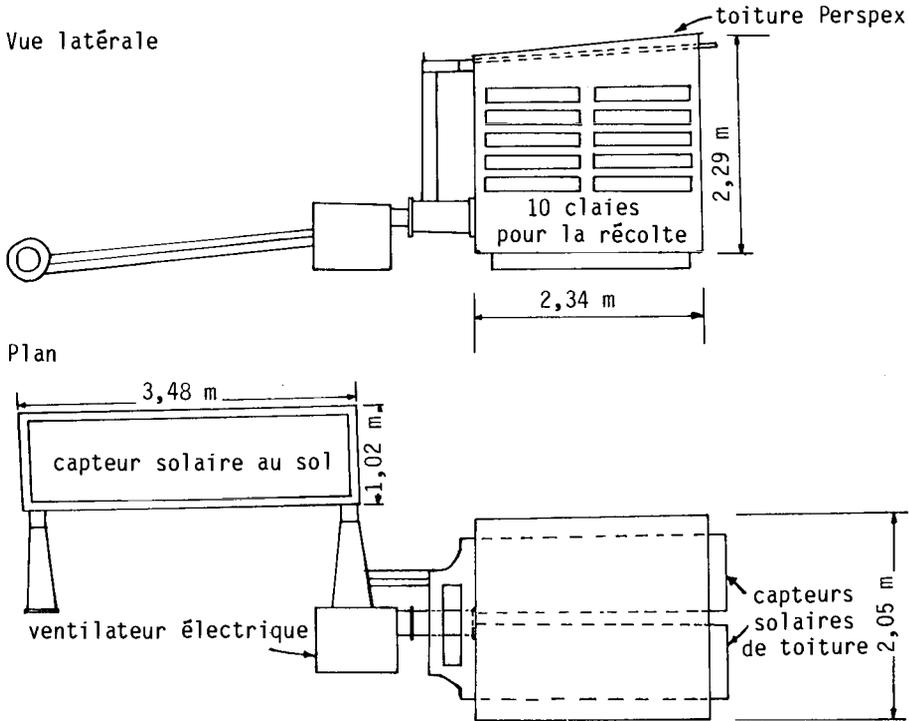


Fig. 5. Séchoir solaire de pyrèthre -- capacité de 400 kg (à l'état humide), temps de séchage : environ 36 heures. Le taux de séchage lent constitue un désavantage.

séché à l'OPK paraît à la figure 6 pour indiquer la principale période de séchage par rapport aux paramètres climatiques -- les agriculteurs acheminent habituellement leur culture sèche dans les deux semaines qui suivent la récolte (Sebbowa et al., 1985).

Données détaillées du séchoir solaire

Le séchoir de pyrèthre conçu par l'UDN (fig. 5) a une capacité de 400 kg (à l'état humide). (Les détails techniques figurent dans Sebbowa, 1985.) Dans son mode à convection naturelle, le capteur solaire est directement relié au séchoir sans passer par le ventilateur électrique. Dans le mode à convection forcée, deux configurations sont possibles : soit un capteur solaire simple (sur le sol) et l'ensoleillement direct des produits à sécher par le toit Perspex; soit aucun ensoleillement direct de la récolte, c.-à-d. les capteurs solaires du toit s'ajoutent au capteur solaire du sol dans le chauffage de l'air. Dans ce dernier mode, la surface totale de captage est près du triple par rapport aux deux autres cas.

Rendement et résultats des essais

La figure 7 présente les taux de séchage typiques du pyrèthre pendant une période pluvieuse (il a plu pendant au moins 50 % de toute la période du séchage) et une période d'ensoleillement. D'après ces

Tableau 2. Conditions climatiques annuelles moyennes des principaux centres de production du pyrèthre.

Centre	Emplacement		Temp. °C		Rayonnement (MJ/m ² /jour)	Ensoleillement (h/j.)	HR(%)		Précip. de pluie (mm/mois)
	Lat.	Longi- tude	Alt.(m)	Max. Min.			Matin	A.M.	
Meru	00°05'S.	37°39'E.	1 538	25 14	19,08	7	80	61	85
Embu	00°30'S.	37°27'E.	1 508	25 15	18,31	7	81	53	94
Thika	01°01'S.	37°06'E.	1 477	26 15	19,40	7	81	50	85
Nairobi	01°18'S.	36°45'E.	1 798	25 14	18,57	7	79	54	77
Naroko	01°08'S.	35°50'E.	1 890	26 9	18,49	8	ind. ^a	ind.	54
Kisli	00°41'S.	34°47'E.	1 732	26 16	ind.	7	70	64	160
Moio	00°14'S.	35°43'E.	2 523	21 7	ind.	ind.	83	79	ind.
Nakuru	00°16'S.	36°04'E.	1 873	26 11	24,10	7	ind.	ind.	78
Nyahururu	00°02'N.	36°17'E.	2 369	22 8	ind.	7	71	53	90
Eldoret	00°34'N.	35°18'E.	2 154	24 11	22,70	7	74	49	116
Région globale	--	--	1 886	24,6 12	20,10	7,1	76,4	57,9	93,2

^a Ind. = nombres indisponibles.

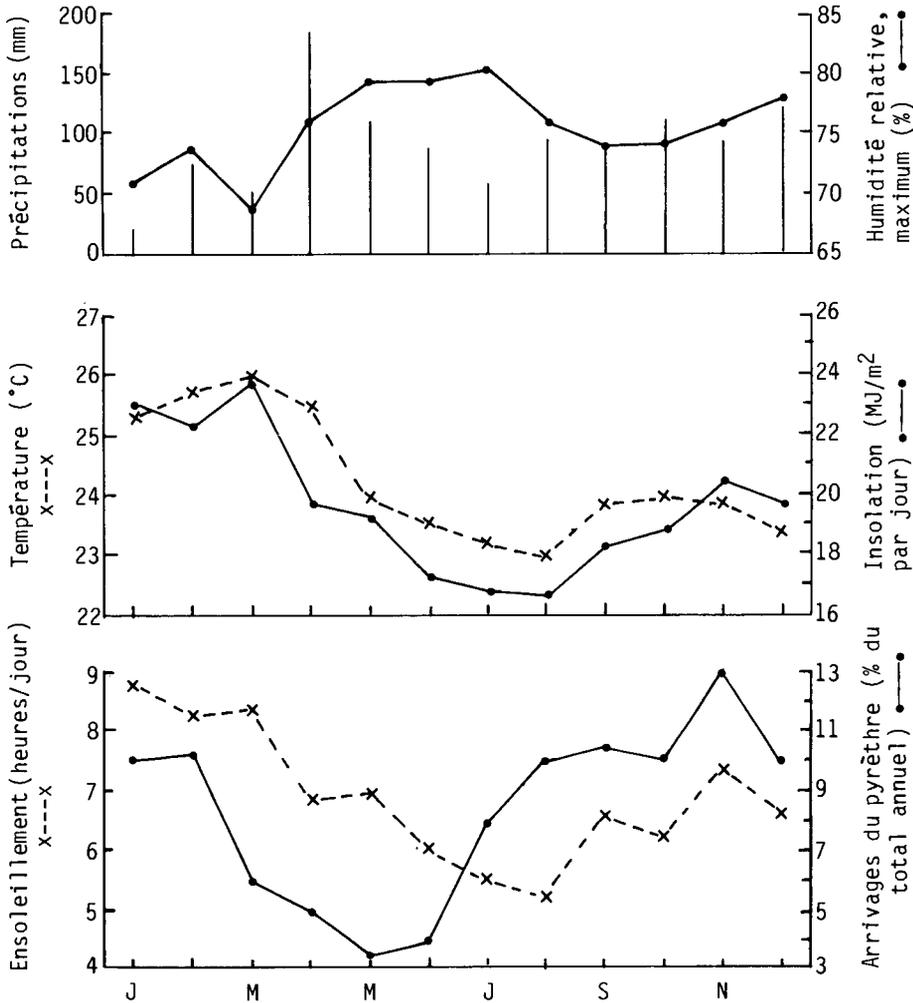


Fig. 6. Moyenne mensuelle des données météorologiques de la région de culture du pyrèthre au Kenya.

résultats, on peut tirer quelques conclusions. Les résultats se fondent sur des essais effectués pendant trois ans sur un prototype et les comparaisons ne touchent que les mois correspondants d'années différentes.

En premier lieu, le séchage par convection forcée prend 5 heures de moins (16 %) en période ensoleillée qu'en période pluvieuse. En deuxième lieu, en mode de convection forcée, la différence entre les trois capteurs solaires (sans ensoleillement direct des produits) et le capteur solaire unique (avec ensoleillement direct des produits) est faible. Ce dernier séchoir est moins coûteux et plus facile à fabriquer. En troisième lieu, le séchoir à convection naturelle n'a

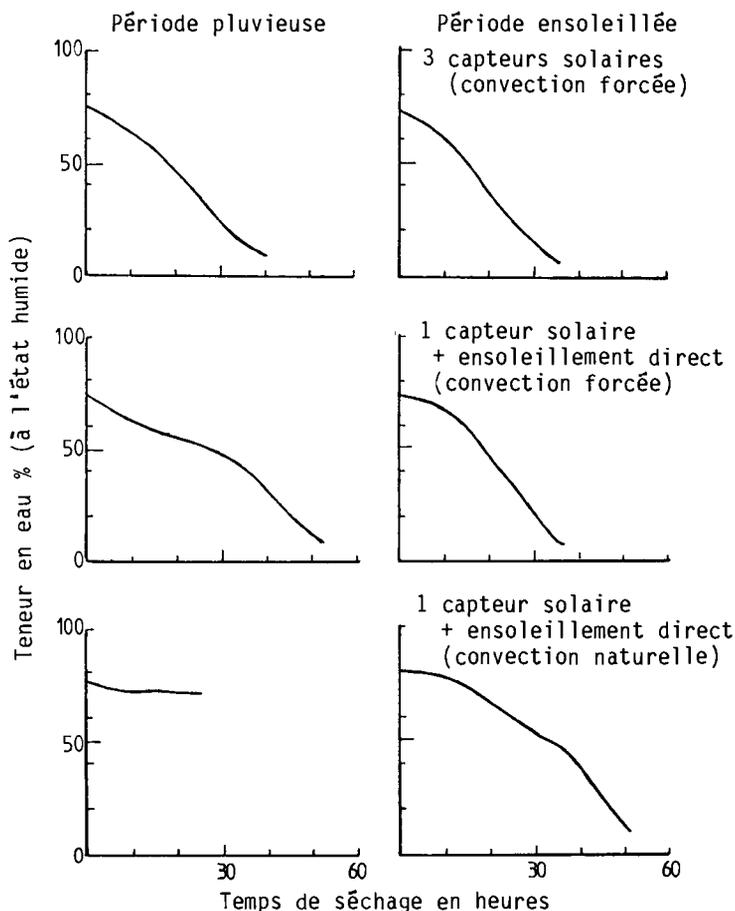


Fig. 7. Modèle de résultats d'essai présentant la teneur en eau (T.E.) par rapport au temps de séchage.

pas un temps de séchage suffisamment rapide pour permettre d'abaisser à moins de 40 % (à l'état humide, É.H.) la teneur en eau des produits dans les 48 heures qui suivent la récolte (environ 15 heures de séchage). En fait, l'essai en période pluvieuse a été abandonné pour éviter de perdre complètement la récolte au pourrissement.

Limitations techno-socio-économiques particulières du séchoir

Ce séchoir solaire particulier comporte trois grandes limitations techniques. D'abord, il fonctionne mal en période de pluie : le faible taux de séchage entraîne souvent un léger pourrissement des produits qui, combiné à la perte de qualité correspondante, découragerait les agriculteurs de recourir à ce séchoir puisque la récolte leur est achetée en tenant compte à la fois de ses qualités et de sa quantité. En deuxième lieu, la récolte peut être mouillée à nouveau pendant la nuit à cause de la rosée provenant de la condensation de

l'humidité de l'air. Enfin, la couverture de vitre est très fragile : bien qu'on pourrait atténuer quelque peu ce problème en insérant un matériau compressible entre la vitre et le cadre du capteur, il se produira tôt ou tard, si on ne règle pas le problème, un bris de la vitre à cause des contraintes exercées par la chaleur.

On n'a pas mesuré la popularité de ce modèle particulier. Toutefois, il est susceptible de souffrir d'une mauvaise réputation à cause d'essais infructueux effectués sur des séchoirs solaires à la fin des années 50 et au début des années 60.

Sur le plan économique, deux restrictions s'appliqueraient sans doute à ce séchoir ainsi qu'au Kenya.

D'abord, les dimensions des matériaux que l'on pouvait se procurer à peu de frais ont restreint la taille du séchoir et, par conséquent, son rendement. Au Kenya, le verre et les feuilles de métal ondulées (pour les tôles des capteurs) se vendent habituellement en grandeurs standard, le gouvernement maintenant les prix artificiellement bas. Toutefois, ces dimensions standard (0,92 m x 2 m ou 2,5 m) ne peuvent être facilement agencées pour obtenir la surface optimale de captage souhaitée. Les matériaux existent dans d'autres dimensions mais à des prix très élevés.

La deuxième limite concernant ce séchoir est son prix relativement élevé (14 000 SHK aux prix de 1986; 1 SHK = 5,5 \$ US) qui ne le rend abordable qu'aux agriculteurs qui exploitent des parcelles supérieures à 12 ha. En l'absence de prêts assortis de conditions libérales, on doit essayer de vendre le séchoir aux agriculteurs susceptibles de réaliser un bénéfice au moins égal à cinq fois le prix d'achat pendant l'année afin de leur permettre d'effectuer sans trop de peine leurs autres dépenses nécessaires (p. ex., des frais de scolarité).

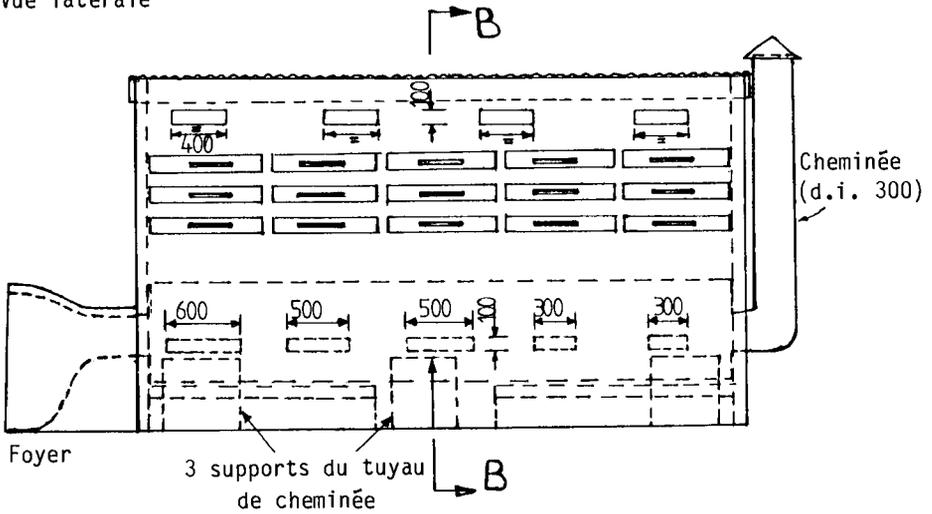
Recommandations

Malgré ses limites, ce séchoir peut accommoder 70 % du pyrèthre destiné au séchage, le reste étant récolté pendant la saison des pluies lorsque le séchage à l'air libre n'est plus possible. Pour surmonter les faiblesses techniques, l'UDN a conçu un séchoir hybride (fig. 8) qui utilise l'énergie solaire comme source principale d'énergie et le bois de feu comme source d'appoint lorsque la pluie ou l'ennuage diminue l'efficacité du séchage naturel. L'adoption d'une source d'énergie auxiliaire est plus ou moins pratique courante dans les systèmes à énergie solaire (comme les chauffe-eau) qui doivent fournir une chaleur à des moments particuliers, qu'il pleuve ou qu'il fasse beau (ASHRAE, 1976).

Pour atténuer la mauvaise réputation liée aux séchoirs solaires, on recommande de réintroduire graduellement un programme de promotion pour ce type d'appareil. Il conviendrait en premier lieu d'installer des modèles de séchoir à des stations agricoles de démonstration afin que tous puissent les voir fonctionner. On procéderait ensuite à la construction de séchoirs sur certaines fermes prospères.

Pour réduire les coûts, du moins au Kenya, les composantes des séchoirs doivent être conçues de manière à permettre aux utilisateurs d'acheter sur le marché des matériaux de dimensions standard (dont les

Vue latérale



Section B-B

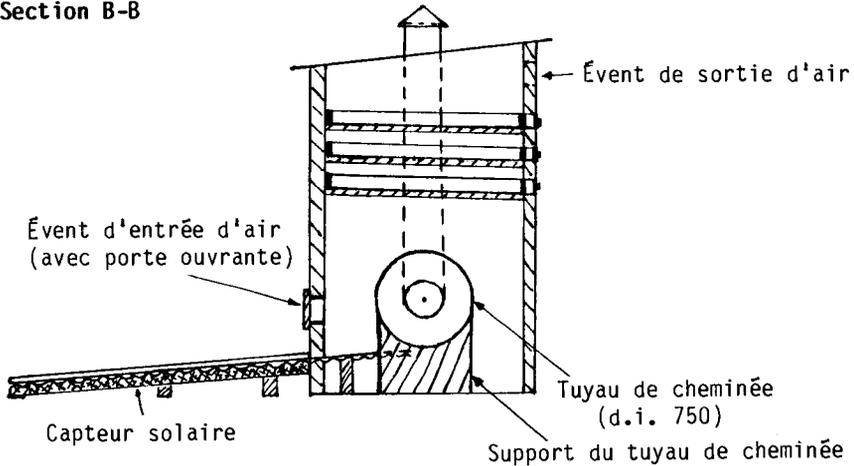


Fig. 8. Séchoir hybride solaire-bois de pyrèthre (les dimensions sont en millimètres).

prix sont contrôlés par l'État), étant donné leur utilisation dans d'autres secteurs de base comme l'habitation.

Limites générales de la recherche sur les séchoirs solaires de récoltes

Identification des utilisateurs finals

Étant donné que les travaux actuels sur les appareils solaires en général ont débuté avec l'apparition de la prétendue crise de l'énergie des années 70, ils ont eu tendance à être orientés sur le

concept même de l'énergie plutôt que sur l'utilisateur final. En effet, on a d'abord conçu des séchoirs solaires pour ensuite préciser les produits qu'ils pouvaient traiter. Dans certains cas, cela s'est traduit par des séchoirs solaires que leurs utilisateurs prévus n'utiliseront même pas soit pour des raisons de coutumes, soit parce que les séchoirs altèrent certaines qualités des produits séchés.

De façon plus particulière, on observe une grave disparité entre le coût des séchoirs solaires et les ressources financières de l'utilisateur. Un agriculteur qui produit 1 000 kg de pyrèthre humide par année et qui en tire 3 750 SHK ne peut se permettre d'acheter un séchoir solaire à un prix de 1 500 SHK étant donné qu'il a d'autres dépenses et qu'il ne peut se prévaloir d'aucune facilité de crédit pour étaler le coût du séchoir sur une longue période. En outre, le séchage à l'air libre suffit depuis longtemps à répondre aux besoins. L'idée d'utiliser plusieurs petits séchoirs (voir fig. 4) pour un agriculteur important ne tient souvent pas compte des frais d'entretien accrus d'un système multiple et, quel que soit le cas, celui-ci pourrait bien prendre autant d'espace que le séchage à l'air libre moins coûteux.

À certaines occasions, des organismes para-gouvernementaux ont encouragé la mise au point de gros séchoirs solaires fabriqués de composantes importées. Bien que de tels organismes puissent obtenir les composantes étrangères à des taux réduits grâce à des subventions entre gouvernements, les entreprises commerciales locales qui doivent payer les taxes complètes ne sont pas emballées par cette idée surtout si l'expérience qu'elles ont des séchoirs ne se base que sur l'unique système offert au siège social de l'organisme para-gouvernemental de l'endroit.

Méthode de recherche

Le problème le plus fondamental est sans doute le manque de données suffisantes et précises. L'absence d'un contact avec les utilisateurs prévus dès les premières étapes constitue l'un des problèmes de base derrière toute conception novatrice. Il arrive souvent que les chercheurs n'examinent pas suffisamment les données sur la production des récoltes que leur fournissent les bureaucrates locaux, lesquels ont cependant la réputation de modifier les chiffres pour les adapter au climat politique de l'heure. Ainsi, de temps à autre, la recherche sur le séchage solaire des récoltes s'est attachée soit à des cultures "abondantes" inexistantes, soit à des cultures auxquelles les méthodes actuelles de séchage convenaient amplement.

Même lorsque les données sur les récoltes sont valables, ce sont les renseignements sur l'insolation et d'autres données climatiques pertinentes qui manquent ou qui sont incomplètes. Même des données imprécises peuvent être modifiées pour donner du sens, mais habituellement le chercheur doit recueillir les données pendant qu'il effectue les travaux sur le séchoir. Or, pour obtenir de véritables schémas climatiques et des chiffres valables sur l'insolation, il faut avoir compilé des données moyennes sur une période d'au moins trois ans, ce que le chercheur ne peut jamais avoir, alors que l'emploi de données modifiées portant sur une courte période (1 an) se solde souvent par des erreurs de conception.

Certains chercheurs ont fait fausse route en croyant qu'un petit prototype de laboratoire pouvait donner les mêmes résultats qu'un séchoir grande nature qui serait utilisé plus tard sur le terrain. Il est vrai que la modélisation est une technique acceptable de conception mais seulement si on suit attentivement les lois de la similitude. Étant donné les fluctuations que l'on rencontre dans les paramètres de base comme l'insolation et les débits, les modèles miniatures ne peuvent que donner des résultats décevants.

En dernier lieu, les organismes de financement n'ont pas réalisé que les chercheurs étaient souvent rattachés à une université ou qu'ils travaillaient à d'autres projets, ne pouvant donc consacrer qu'une partie de leur temps à l'occupation désirée. La demande qui leur aurait été faite de produire des rapports fréquents, que ce soit pour l'étape d'analyse de la situation ou une autre, pourrait amener le chercheur à se concentrer sur la rédaction des rapports et à négliger la recherche elle-même, ou bien à effectuer à la hâte des expériences renfermant des erreurs et conduisant à des interprétations fausses.

Échange technologique

Les chercheurs ne peuvent facilement mettre la main sur les travaux de recherche effectués par diverses institutions. Les coordonnateurs de la recherche dans bien des pays en développement doivent être davantage portés à communiquer les conclusions des recherches disponibles à d'autres chercheurs qui pourraient en bénéficier. En outre, les chercheurs principaux auraient avantage à fournir un meilleur leadership lors de la réalisation des expériences et au moment d'en présenter les résultats. À l'heure actuelle, on accorde une importance beaucoup trop grande aux déclarations de principe des chercheurs principaux et des universitaires des pays en développement.

Le manque de collaboration entre l'industrie locale et les chercheurs continue de faire obstacle au progrès non seulement dans la recherche mais aussi dans le développement. L'industrie locale est bien placée pour apprécier l'utilité des diverses inventions nouvelles, comme le séchoir solaire de récoltes; or, la plupart des chercheurs attendent la fin des études pour contacter l'industrie locale, s'attendant d'elle qu'elle commercialise tous les produits qui viennent d'être mis au point. Il n'est pas surprenant que l'industrie ait hésité à emboîter le pas.

L'échange de technologie entre le Nord et le Sud laisse beaucoup à désirer. Les nouveaux diplômés du Nord se rendent dans le Sud pour y offrir leurs services dans le cadre de programmes d'aide ou de subventions de leur propre pays, mais le Sud n'utilise pas les compétences mises à sa disposition. Pour la moitié des frais que commandent ces "experts", on pourrait recourir aux spécialistes du Sud pour effectuer des recherches productives et des fonds existeraient pour commercialiser des produits, etc.

Le transfert de l'information technologique à l'échelle mondiale est très pauvre. L'Institut de recherches Brace et l'Organisation des Nations-Unies pour le développement industriel (ONUDI) ont tous deux l'excellente idée d'envoyer, à intervalles réguliers, les conclusions de leurs travaux de recherche à tous ceux qui pourraient en bénéfi-

cier. D'autres organismes de recherche auraient avantage à dresser une liste d'envoi du même genre ou à augmenter celles que l'on sait trop restreintes à l'heure actuelle. De cette manière, un auditoire plus important aurait accès aux résultats et aux conclusions qui pourraient intéresser un plus grand nombre de chercheurs que ceux qui les reçoivent présentement. Il arrive souvent que les chercheurs ignorent que les secrétariats et sièges sociaux d'organismes dans le Nord possèdent des renseignements essentiels et primordiaux sur leurs travaux.

Pour que le matériel de recherche donne des résultats probants, il doit être étalonné à intervalles périodiques. Le problème est particulièrement aigu lorsque le matériel est fabriqué dans le Nord et utilisé dans le Sud. Dans beaucoup de pays en développement, le matériel utilisé à des fins de recherche n'a fait l'objet d'aucune vérification pour en garantir l'exactitude. Le chercheur qui ne possède qu'un appareil ne peut jamais savoir s'il obtient des mesures exactes à moins de pouvoir étalonner régulièrement sa pièce d'équipement.

Conclusion

Il est nécessaire qu'au moins le cultivateur de pyrèthre du Kenya dispose d'un séchoir solaire de récoltes à cause de la quantité importante des produits à sécher et du coût élevé des solutions de rechange au séchage à l'air libre. Les problèmes techniques que soulève le prototype de séchoir solaire existent toujours mais peuvent être résolus. Le séchoir hybride (fig. 8) mentionné précédemment serait l'une des solutions, mais il y en a d'autres.

De façon générale, le séchage solaire de récoltes continue d'être assailli par divers problèmes. Quelques-uns pourraient être surmontés.

- Une première étape du processus de recherche consiste à bien circonscrire les récoltes qui ont besoin de séchage.
- La collecte et l'analyse de données sur l'insolation (et d'autres renseignements pertinents) doivent devenir une priorité.
- Les chercheurs doivent consulter l'industrie locale dès les premières étapes de la mise au point d'un produit.
- L'aide financière ou les autres formes de rémunération accordées aux chercheurs devraient correspondre au temps et aux efforts qu'ils consacrent à la recherche.
- Il faudrait favoriser la diffusion de renseignements utiles sous le couvert de rapports périodiques réguliers exposant les conclusions des travaux de recherche ainsi que les progrès dans toutes les sphères pertinentes de la recherche.
- Il convient de délaissier le système du "spécialiste du Nord qui émigre vers le Sud avec quelques boîtes noires sous le bras" en faveur d'un programme de formation des compétences potentielles du Sud jusqu'à ce qu'elles atteignent un niveau d'autonomie suffisant. La formation pourrait avoir lieu dans le Nord ou dans le Sud.

Il convient d'établir des centres stratégiques dans le Sud pour assurer l'étalonnage des appareils de manière que les chercheurs puissent obtenir des résultats et des données valables sur le vieux matériel.

À moins que la plupart des recommandations précitées ne soient mises en oeuvre, je suis convaincu que le séchage solaire des récoltes dans la plupart des pays en développement continuera de piétiner et que les rapports non diffusés ne pourront solutionner les problèmes du séchage des récoltes dans le monde en développement.

Remerciements -- Cette communication a été rendue possible principalement grâce à l'aide du Conseil national des sciences et de la technologie du Kenya et en partie par le Commonwealth Science Council et l'Université de Nairobi. Je suis également redevable à la British Overseas Development Administration de son aide financière.

Bibliographie

- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). 1976. Method of testing solar collectors based on thermal performance. ASHRAE, New York, N.Y., USA. Technical Report Standard 93-P (1976).
- Mrema, G.C. 1984. African energy programme: solar crop drying project -- an overview of the project. Paper presented at the African Energy Programme Review Meeting, Harare, Zimbabwe, 15-20 October 1984. Commonwealth Science Council, Londres, R.-U.
- Othieno, H. 1985. Optimisation of solar air heating collectors used for crop drying. In Renewable energy developments in Africa: Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius, 25 March-1 April 1985. Vol. 2. Commonwealth Science Council, Londres, R.-U.
- Sebbowa, F.B. 1985. Design considerations and prototype tests on a pyrethrum flow solar energy dryer. In Renewable energy developments in Africa: Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius, 25 March-1 April 1985. Vol. 2. Commonwealth Science Council, Londres, R.-U.
- Sebbowa, F.B., Preston, K., Gwara, N. 1985. Field visitation report: the Kenyan pyrethrum farmers' needs. University of Nairobi, Nairobi, Kenya. Rapport inédit.
- Trim, D.S., Brenndorfer, B. 1985. Development of a Three Stage Solar Drying System for Coffee. In Renewable energy developments in Africa: Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius, 25 March-1 April 1985. Vol. 2. Commonwealth Science Council, Londres, R.-U.

LE SÉCHAGE SOLAIRE AU MALI

Modibo Dicko¹

Résumé — L'auteur examine ici le climat et le relief du Mali, les produits agricoles qui sont habituellement séchés ainsi que les méthodes traditionnelles de séchage. Il décrit les activités de recherche et les expériences de séchage solaire effectuées sur le terrain; enfin, il propose un programme futur de recherche sur le séchage solaire.

Introduction

La conservation des denrées alimentaires est une nécessité vitale au Mali, car elles sont pour la plupart produites de façon saisonnière alors que leur consommation s'étale généralement sur toute l'année. Le séchage est pratiquement le seul moyen de conservation le plus répandu en raison de la simplicité de sa mise en oeuvre et de son faible coût. Il faut noter qu'avec une longue saison sèche, caractérisée par des températures ambiantes élevées et des humidités relatives de l'air très faibles, le climat malien est particulièrement favorable à la pratique du séchage, alors qu'il rend difficiles et peu économiques d'autres pratiques telles que, par exemple, la réfrigération et la congélation. Les techniques et les durées du séchage varient légèrement selon les produits, mais elles font toutes appel au séchage naturel grâce à l'action combinée du vent et du soleil auxquels sont exposés les produits. Les inconvénients de ce séchage naturel sont bien connus : manque d'hygiène et de sécurité, pertes souvent considérables. L'amélioration de cette technique s'avère par conséquent être une nécessité économique vitale.

Notre étude commence d'abord par l'analyse des données météorologiques influant sur les conditions de séchage. La seconde étape porte sur la pratique actuelle du séchage au Mali. La troisième partie de l'étude est consacrée aux recherches menées au Mali pour la mise au point des séchoirs solaires. Les expériences de séchage amélioré, menées sur le terrain en zone rurale, constituent l'objet de la quatrième partie. Enfin, la dernière partie de l'étude est consacrée au programme futur de recherche sur le séchage solaire au Mali.

Contexte climatique

Le Mali est un vaste pays couvrant une superficie de 1 240 000 km², et dont les points extrêmes se trouvent à 4,3° de longitude Est, 12,5° de longitude Ouest, 10,5° et 25° de latitude Nord. Le Mali est

1. Laboratoire de l'énergie solaire, Bamako, Mali.

situé en plein coeur de l'Afrique occidentale. Les types de climat et de végétation s'étendent du type saharien au type guinéen. On distingue une saison sèche (octobre à mai) et une saison pluvieuse (juin à octobre).

Le Service météorologique effectue depuis plusieurs décennies des mesures de température (tableau 1) et d'humidité de l'air (tableau 2), de vitesse du vent (tableau 3) et des durées d'ensoleillement (tableau 4) dans plusieurs villes du pays.

Quant à la mesure de l'intensité du rayonnement solaire, elle est effectuée seulement depuis 1981 par le Service météorologique à Bamako, Bougouni, San et Tombouctou, et par le Laboratoire de l'énergie solaire à Bamako, Bougouni, Gao, Niore et San. Après une compilation des données couvrant la période de 1981 à 1984 inclusivement, il s'avère que seules celles recueillies à Bamako par le Laboratoire de l'énergie solaire sont fiables. Le tableau 5 donne les valeurs moyennes calculées à partir de ces données. Leur étude statistique nous a permis d'établir les relations suivantes (Dicko, 1986) :

$$\frac{H}{H_0} = 0,28 + 0,28 \left(\frac{n}{N} \right) \quad [1]$$

$$\frac{H_d}{H} = 0,432 - 0,32 \times K_t \quad [2]$$

avec:

H : irradiation journalière globale en moyenne mensuelle

H₀ : irradiation globale extra-terrestre journalière en moyenne mensuelle

n : durée journalière d'ensoleillement en moyenne mensuelle

N : durée théorique d'ensoleillement du jour moyen du mois (Klein, 1980)

H_d : irradiation diffuse journalière en moyenne mensuelle

K_t : moyenne mensuelle de la fraction d'insolation

Nous recommandons l'utilisation de ces formules pour la moitié sud du pays. Pour le Nord désertique, nous recommandons la formule suivante établie pour Tamanrasset au Sud de l'Algérie et rapportée par Duffie et Beckman (1980).

$$\frac{H}{H_0} = 0,30 + 0,43 \left(\frac{n}{N} \right) \quad [3]$$

Pratique actuelle du séchage

Le séchage est pratiqué sur une grande variété de produits alimentaires. Les techniques et les durées du séchage varient légèrement selon les produits, mais elles font toutes appel au séchage naturel grâce à l'action combinée du soleil et du vent auxquels sont exposés les produits (Duffie et Beckman, 1980; Dicko, 1986).

Les céréales

La méthode traditionnelle de séchage comporte trois étapes : à la première étape les grains arrivés à maturité ne sont récoltés qu'assez tardivement et subissent un début de séchage : cette pratique entraîne

Tableau 1. Températures mensuelles et annuelles moyennes en degré Celsius.

Villes	Moyenne annuelle	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
		Bamako	28,4	25,5	28,0	30,9	32,4	31,9	29,1	28,0	26,0	26,2	27,8
Kayes	29,6	25,4	28,0	31,2	34,1	35,5	32,1	28,7	27,9	27,8	29,4	28,9	25,8
Ségou	27,9	24,0	26,6	29,7	32,2	32,7	29,9	27,6	26,5	27,0	27,6	27,2	24,3
Gao	29,2	22,6	25,2	28,8	32,3	32,1	34,7	32,9	29,8	31,3	31,7	27,2	21,2
Tombouctou	29,8	22,6	25,4	28,5	31,8	34,3	33,9	31,5	35,5	31,2	31,7	28,3	22,8
Kidal	28,9	19,5	22,2	30,5	29,3	34,3	34,9	32,5	31,2	32,3	31,1	27,9	20,9

Tableau 2. Humidité relative de l'air (%).

Villes	Moyenne annuelle	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
		Bamako	52	28	24	25	34	51	68	77	81	79	69
Kayes	44	29	19	17	19	30	53	72	79	79	69	43	28
Ségou	49	31	25	26	28	43	58	73	80	77	65	46	36
Gao	31	22	18	17	18	25	37	49	58	54	33	24	23
Tombouctou	36	27	23	22	20	27	40	55	65	57	35	28	30
Kidal	27	23	18	20	21	16	24	38	47	36	26	26	25

Tableau 3. Vitesse moyenne du vent (1961-1970) en m/s.

Ville	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Moyenne
													annuelle
Bamako	2,1	2,4	2,4	2,4	2,8	3,4	3,4	2,9	2,1	3,0	2,0	1,8	2,6
Gao	4,2	4,3	4,4	4,3	4,3	5,0	5,1	4,4	4,1	3,7	3,9	3,9	4,3
Kayes	1,9	1,9	2,0	2,3	2,7	3,1	2,5	1,9	1,5	1,4	1,4	1,6	2,0
Mopti	1,3	3,4	3,6	3,4	3,5	3,5	3,5	2,5	2,2	2,1	2,4	2,5	3,0
Ségou	2,4	2,5	2,5	2,2	2,2	2,5	2,0	1,5	1,2	1,1	1,8	2,2	1,8
Tessalit	4,6	5,0	4,8	4,5	5,0	5,0	4,9	5,0	4,3	4,5	4,2	4,0	4,7

Source : Direction nationale de la météorologie.

Tableau 4. Ensoleillement mensuel en heures* pour quelques villes importantes du Mali.

Ville	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Total
Bamako	266,5	242,2	269,9	241,8	216,1	204,5	194,6	163,7	197,9	230,2	243,0	219,3	2688,7
Gao	275,8	264,4	288,3	293,7	285,7	265,7	276,0	266,9	273,2	291,5	289,2	269,8	3339,6
Kayes	253,0	233,4	300,8	286,3	253,7	218,6	197,4	187,4	208,9	241,0	247,6	201,4	2829,5
Mopti	229,7	224,8	251,4	249,6	233,7	240,4	255,9	205,9	231,0	259,5	248,5	190,4	2790,8
Ségou	286,1	269,2	296,0	281,3	271,0	273,7	251,5	225,7	247,3	293,9	282,8	277,3	3255,8
Tessalit	299,7	289,0	315,4	311,7	305,7	265,6	293,9	285,0	272,6	300,3	269,2	258,9	3447,0

Source : Direction nationale de la météorologie.

* Mesure effectuée en 1/10 d'heure.

Tableau 5. Moyennes sur 4 ans (1981 à 1984 inclusivement) des valeurs mensuelles moyennes du rayonnement global, diffus et direct à Bamako (kWh/m², jour).

	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Rayonnement global	4,77	4,57	4,57	4,35	4,06	5,90	3,90	3,88	4,11	3,93	3,97	4,03
Rayonnement diffus	1,04	1,23	1,30	1,35	1,14	1,36	1,24	1,34	1,11	0,98	0,77	1,00
Rayonnement direct	3,73	3,34	3,27	3,00	2,92	2,54	2,66	2,54	3,00	2,95	3,20	3,03

Source : Laboratoire de l'énergie solaire.

beaucoup de pertes dues à l'égrenage et à la verse; à la deuxième étape, avant le battage, les épis récoltés sont attachés en gerbes, puis disposés en tas coniques sur une aire aménagée à cet effet dans le champ. Les cônes peuvent atteindre 2 à 4 m de diamètre et 1,5 à 2 m de hauteur. Cette étape dure de 2 à 4 semaines selon la disponibilité de la main-d'oeuvre pour le battage; à la troisième étape, après le battage, la récolte est ramenée au village où elle est étalée sur des aires spécialement aménagées (terre battue, nattes ou sacs) et elle sèche au soleil pendant plusieurs jours. Le maïs en spathe est, quant à lui, étalé sur des plates-formes de bois ou de paille et sur le toit des habitations.

Cette méthode présente les inconvénients suivants : égrenage et verse dus à la récolte tardive; risque de vol durant le séchage au champ; infestation par la poussière, les insectes et les animaux errants; risque de réhumidification à cause des pluies tardives et manque d'espace. La période de séchage s'étale d'octobre à novembre.

La production annuelle normale se chiffre entre 800 000 et 900 000 t pour toutes les céréales cultivées.

L'arachide

Après le déterrage, les arachides sont disposées en petits tas dans le champ, les gousses tournées vers l'extérieur à l'air libre. Une semaine après, les arachides sont mises en meules sur pilotis, c'est-à-dire sur des plates-formes surélevées en bois ou paille pour que l'air puisse circuler de bas en haut. Cette circulation est favorisée par un passage pratiquée au milieu de la meule. Le séchage en meule dure 2 à 3 semaines. Ensuite les gousses sont séparées des fanes. Les arachides sont ramenées au village où elles sont étalées sur des plates-formes de bois ou de paille sur le toit des habitations ou dans des paniers coniques spécialement tressés à travers lesquels l'air passe facilement et accélère le séchage. Cette technique présente les mêmes inconvénients que celle appliquée aux céréales. La période de séchage est également la même. La production annuelle est estimée à 110 000 t.

Le tabac

Le tabac de type Virginie est séché dans des séchoirs dits "flue curing" comportant un four à bois et une chambre de séchage en maçonnerie. Ce processus très compliqué dure plusieurs jours et consomme de 6 à 12 stères (1 stère = 1 m³ de bois) de bois par fournée. L'inconvénient majeur de cette technique est sa consommation énorme de bois. Les autres variétés de tabac séchent à l'air libre en suspendant à des branches les feuilles de tabac dans un espace clos. La durée du séchage peut atteindre 45 jours. Cette technique ne nécessite pratiquement aucune amélioration. La période de séchage couvre le mois d'octobre pour la culture d'hivernage et les mois de janvier et février pour la culture de contre-saison. La production annuelle est d'environ 250 tonnes.

Les fruits et légumes

Le séchage des légumes se fait au niveau familial en petites quantités, car chaque femme sèche ses légumes séparément. Il s'agit principalement du gombo, du piment, des oignons et dans une moindre

mesure, des tomates. Les légumes sont étalés en une seule couche au soleil sur des pierres propres, des nattes ou de la paille, parfois sur le toit des hangars. Le séchage est très rapide et ne dure que de un à deux jours.

Le gombo et le piment sont mis à sécher en entier. Le produit sec est ensuite pilé et réduit en poudre. Les bulbes et les feuilles d'oignons sont écrasés puis mis en boules que l'on fait ensuite sécher au soleil. Les tomates sont coupées en deux, égrainées et étalées au soleil. Elles brunissent beaucoup et le produit final n'est pas de bonne qualité. La période de séchage s'étale de février à avril.

Les fruits ne sont pas traditionnellement séchés. On les consomme à l'état frais pendant la saison de récolte et on s'en passe après. À cause de la surproduction et du manque de moyen de conservation, on observe beaucoup de perte par pourrissement.

Le poisson

Le séchage du poisson comporte les opérations suivantes : le nettoyage, le traitement chimique, la fermentation et le séchage. Le poisson est écaillé, étripé, étêté, ouvert à partir de l'épine dorsale et rincé à l'eau. Après ce nettoyage, le traitement chimique débute. Introduit en milieu pêcheur par l'Opération Pêche de Mopti, il consiste à tremper le poisson pendant 2 à 3 heures dans une solution de "gardonan", un produit chimique fabriqué par Shell-Chimie. Grâce à ce traitement, après 2 mois de conservation les pertes dues aux insectes passent de 30 à 40 % à seulement 10 à 15 %. Après cette étape vient la fermentation. Afin de donner au poisson séché le goût faisant de lequel il doit son succès auprès des populations, le poisson est entassé en vrac pendant quelques heures en saison chaude, et plusieurs jours en saison froide, afin de lui faire subir un début de fermentation. Souvent cette opération est combinée avec le trempage dans l'eau de "gardonan". Le poisson est ensuite étalé sur une litière de paille séchée, côté ouvert au soleil pour l'étape du séchage. Pendant la saison pluvieuse, l'étalage se fait sur le toit de hangars spécialement édifiés afin de protéger le poisson contre l'humidité du sol. La durée du séchage varie de 2 à 3 jours en saison sèche à près d'une semaine en saison pluvieuse. Elle varie également en fonction de la taille et de l'espèce du poisson. La période de séchage couvre pratiquement toute l'année, bien que la pêche connaisse un ralentissement très marqué pendant la période des hautes eaux (juin à septembre).

Les inconvénients de cette technique sont les pertes énormes dues à l'attaque des larves voraces de mouches pendant le séchage et le stockage, ainsi que la souillure par la poussière et le sable. Les prises annuelles sont estimées à 100 000 t en moyenne pour une année normale. La proportion de poisson séché varie selon les zones : autour du lac artificiel de Sélingué par exemple, la proportion de poisson séché est de 10 % du total des prises, soit 1 500 tonnes en moyenne par an.

La viande

La viande séchée est un produit de consommation courante chez les populations nomades du Nord du Mali. Traditionnellement la viande est découpée en tranches fines qui sont directement étalées sur le sable

du désert. À cause du soleil et du vent, tous deux abondants dans ces régions, le séchage est très rapide et ne dure que de un à deux jours, mais la viande est souillée par le sable qui s'y incruste.

Une version améliorée de ce séchage naturel a été introduite il y a deux ans : il s'agit d'un espace entièrement couvert de moustiquaire dans laquelle sont suspendues des claies sur lesquelles sont déposées les tranches de viande préalablement immergées pendant une minute dans une solution salée bouillante. Cette méthode améliorée ne protège cependant pas la viande contre la poussière entraînée par le vent.

Les séchoirs solaires

Les premiers systèmes étudiés étaient des séchoirs solaires à convection naturelle. Le séchoir indirect (voir fig. 1a), fait en tôles d'acier, comporte un capteur de $1,28 \text{ m}^2$ couvert de verre et a une capacité de l'ordre de $9,5 \text{ kg}$ de produits frais. Le séchoir TAOST (voir fig. 1b), fait en bois (contre-plaqué de 20 mm), comporte une couverture en plastique transparent de 2 m^2 de surface et a une capacité de l'ordre de 15 kg de produits frais. Le séchoir SERRE (voir fig. 1c) est constitué d'une structure parallélépipédique en bois de 3 m de long, 2 m de large et 2 m de haut, couvert de polyéthylène noir sur la face nord et de polyéthylène transparent sur les autres faces; il a une capacité de l'ordre de 45 kg de produits frais. Ces séchoirs ont été testés avec divers produits, notamment le poisson, la viande, la mangue, les oignons, le gombo et la tomate (Dembele, 1982; Traore, 1982).

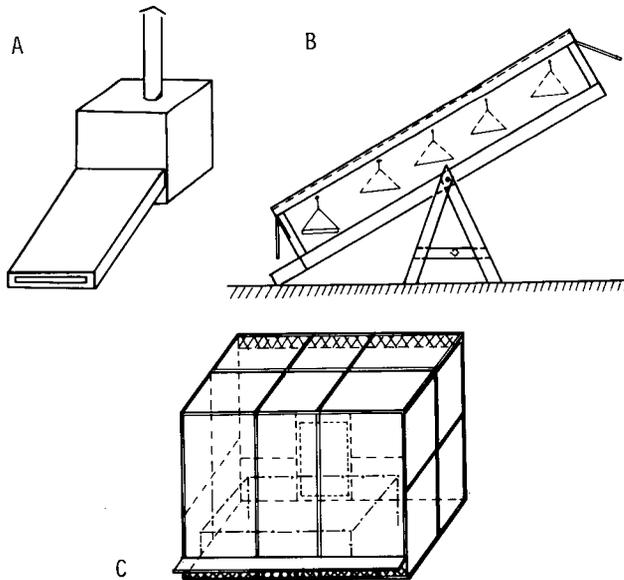


Fig. 1. a : séchoir indirect, b : séchoir de type TAOST et c : séchoir de type SERRE.

Résultat des recherches sur le séchage solaire

Les produits couramment séchés au Mali peuvent se classer en deux catégories : ceux qui séchent en couche mince tels que le poisson, la viande, les légumes et ceux qui séchent en couche épaisse tels que les céréales. Les produits de la première catégorie ont attiré l'attention du Laboratoire de l'énergie solaire parce qu'ils sont plus humides et plus périssables à l'état frais que les seconds. De grands efforts ont été déployés pour mettre au point des systèmes de séchage solaire en couche mince adaptés au Mali. À la suite de ces tests, les conclusions suivantes se sont imposées :

- le séchoir indirect (fig. 1a) s'est avéré peu performant car la durée du séchage est plus longue qu'à l'air libre. Certains produits très humides, comme la tomate, finissent par pourrir avant de sécher. Cela est certainement attribuable à la mauvaise ventilation provoquée par l'effet de cheminée. Un effort d'optimisation technique reste donc à fournir pour pallier cet inconvénient.
- Les séchoirs TAOST (fig. 1b) et SERRE (fig. 1c), qui sont du type direct, se sont avérés plus performants. Ces bons résultats s'expliquent d'une part par le fait que les produits atteignent une température plus élevée à cause de l'absorption directe du rayonnement solaire; mais d'autre part il faut signaler l'existence d'une bonne ventilation dans ces séchoirs à cause de leur configuration qui provoque peu de pertes de charge et aussi à cause du fait que la colonne d'air est continuellement chauffée contrairement au séchoir indirect (fig. 1a).
- Étant donné que ces séchoirs sont destinés au milieu rural, nous avons été amenés, pour réduire leur coût, à réaliser les couvertures transparentes en matière plastique et non en verre. Trois matériaux ont été essayés : le polyéthylène (produit au Mali), un tissu siliconé fabriqué par la firme Dow-Corning (importé) et le mylar (importé). Ces tests ont montré que le polyéthylène a une durée de vie de 2 à 3 mois, le tissu siliconé et le mylar ont une durée de vie de près de 2 ans. En ce qui concerne les coûts, le mylar revient aussi cher que la vitre, alors que le tissu siliconé est très bon marché. C'est donc ce dernier produit que nous recommandons.

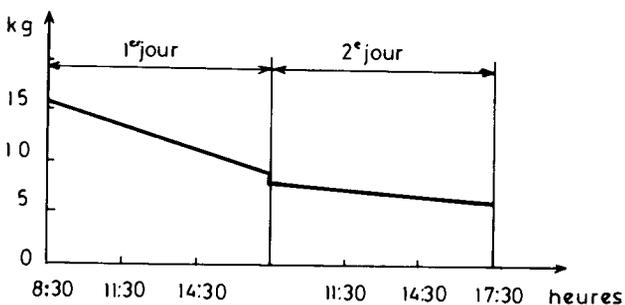


Fig. 2. Courbe de séchage du poisson dans le séchoir de type TAOST.

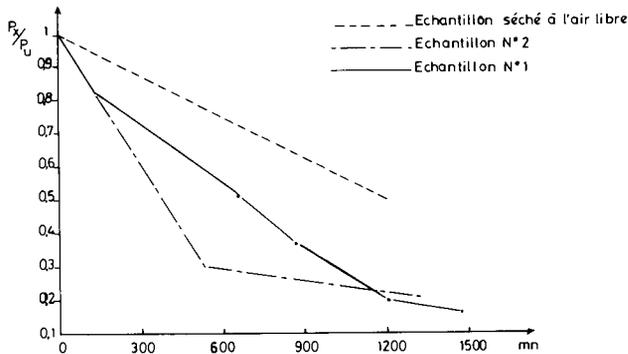


Fig. 3. Courbe de séchage de la mangue dans le séchoir de type TAOST. (Les échantillons n° 1 et 2 ont été séchés dans des séchoirs solaires, mais sur différentes claies.

P_x = poids instantané. P_u = poids initial.)

L'inconvénient majeur des séchoirs à convection naturelle est leur faible capacité. En effet, notre expérience, ainsi que celle rapportée dans les ouvrages spécialisés, indique que pour obtenir un bon rendement, la surface des claies ne doit pas dépasser celle des capteurs. Donc pour augmenter la capacité de ces séchoirs, il faut augmenter la surface de leurs capteurs avec comme conséquence une augmentation notable de leur coût. Aussi, peut-on affirmer que ces séchoirs ne sont adaptés qu'à une utilisation familiale au sein des communautés rurales.

Pour des besoins plus importants, comme ceux d'une coopérative ou d'une industrie par exemple, il est nécessaire de recourir à la convection forcée pour assurer une ventilation correcte des séchoirs grâce à l'utilisation de ventilateurs. Ces derniers sont à même d'assurer un plus grand débit d'air et sont donc plus adaptés, sinon indispensables, aux séchoirs de grande capacité. Un autre avantage des séchoirs à convection forcée est que le débit d'air est indépendant des conditions climatiques ambiantes et peut donc être facilement contrôlé dans la plupart des cas.

En outre, ces séchoirs permettent, grâce aux débits d'air plus élevés, d'obtenir de meilleurs rendements des capteurs solaires et par conséquent de diminuer la surface de captation requise par kilogramme de produits à sécher, ce qui a une grande incidence sur le coût des systèmes.

C'est pourquoi, à la demande de l'"Opération Pêche de Mopti" (organisme public pour le développement de la pêche au Mali), le Laboratoire de l'énergie solaire a mis au point un séchoir solaire à convection forcée pour le poisson. Ce système comporte un isolateur de 14 m² de surface effective, deux ventilateurs à débit réglable et une chambre de séchage d'environ 3 m³ (Dicko, 1985, 1986). Sa capacité est d'environ 150 kg de poisson frais. Le capteur est disposé en toiture. Le volume ainsi couvert abrite la cabine de

séchage ainsi que le local des ventilateurs et un espace de stockage de produits séchés (fig. 4).

Un premier prototype a été construit à Bamako sur le terrain d'essais du Laboratoire d'énergie solaire. Il comporte un capteur à simple vitrage et à double passe parallèle. Ce séchoir a été testé de façon exhaustive pendant deux ans. Les figures 5 et 6 présentent les relevés de température et la courbe de séchage dans le séchoir à convection forcée. Les résultats de ces tests étaient encourageants, mais nous avons remarqué au fil du temps un dépôt de plus en plus dense de poussière sur la face supérieure de l'absorbeur, ce qui diminuait de façon sensible le rendement du capteur.

Par la suite, lors de la construction du deuxième prototype à Mopti au siège de l'Opération Pêche, nous avons opté pour un capteur à simple passe où l'air circule seulement en dessous de l'absorbeur, dont la face supérieure n'est plus sujette au dépôt de poussière. Ce séchoir est opérationnel et est surtout utilisé pour le reséchage du poisson séché ou fumé qui absorbe de l'humidité lors de son transport des campements de pêche vers Mopti. La figure 7 donne un exemple de courbes de reséchage effectué dans ce séchoir (Dicko, 1985, 1986). En plus du poisson, le séchoir à convection forcée de Bamako a été testé avec succès pour d'autres produits, notamment la mangue et les oignons.

Bien qu'ayant donné sur le plan technique des résultats satisfaisants lors des différents tests, ce modèle de séchoir présente cependant deux inconvénients majeurs : d'une part, son coût est très élevé du fait que la plupart des composantes sont fabriquées en usine à partir de matériaux importés (tôles d'acier, laine de verre, etc.); d'autre part, ce séchoir comporte une chambre de séchage, et une fois celle-ci chargée de produits frais, il faut attendre que ces derniers sèchent complètement afin de procéder à un autre chargement. Il ne convient donc pas aux situations où l'on dispose journalièrement de produits à sécher, comme c'est le plus souvent le cas.

Il est clair par conséquent que pour parvenir à une utilisation généralisée de ce type de séchoir solaire, des efforts supplémentaires restent à fournir en vue de leur optimisation techno-économique.

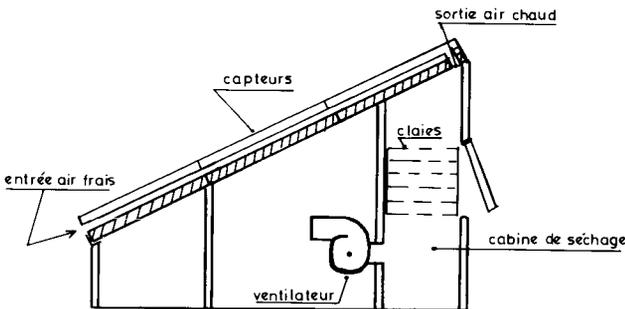


Fig. 4. Schéma du séchoir à convection forcée.

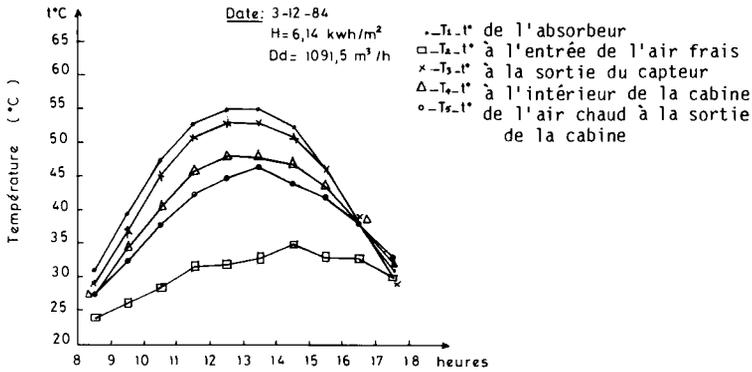


Fig. 5. Relevé de température dans le séchoir à convection forcée sans charge, 3 décembre 1984.

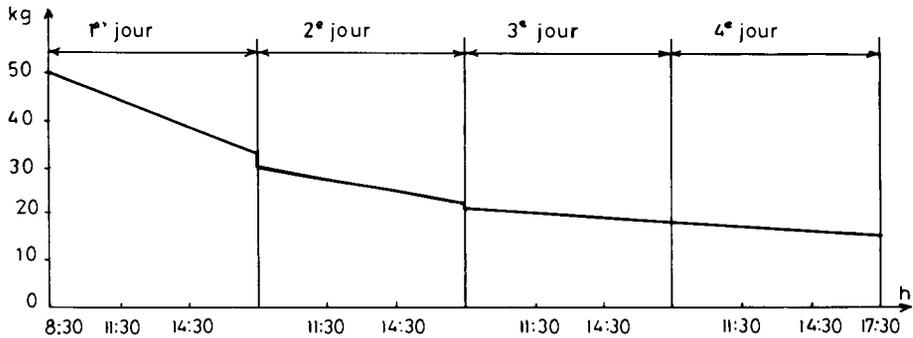


Fig. 6. Courbe de séchage du poisson frais dans le séchoir à convection forcée.

Expériences de séchage solaire sur le terrain

Les trois types de séchoir solaire ayant réussi les essais en laboratoire ont été introduits sur le terrain dans le cadre du projet "Traitement du poisson" financé par le Centre de recherches pour le développement international (CRDI), et du projet "Énergies renouvelables" financé par l'USAID. Il s'agit de séchoir à convection forcée, du séchoir TAOST et du séchoir SERRE. Leur répartition était la suivante : Bêlénitiégn (San) : 2 séchoirs TAOST, 2 séchoirs SERRE; Djidara (Gao) : 2 séchoirs SERRE; Mopti-ville : 1 séchoir à convection forcée; Sensê-Daga (Mopti) : 2 séchoirs TAOST; Batamane : 2 séchoirs SERRE; Sêlinguê : 8 séchoirs TAOST.

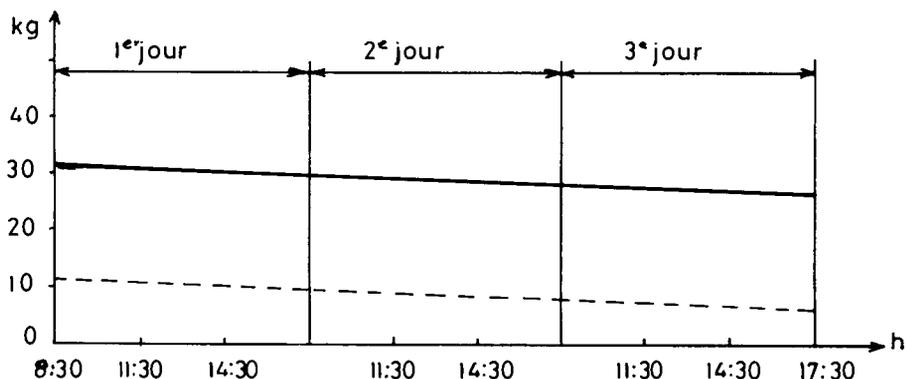


Fig. 7. Courbe de reséchage du poisson dans le séchoir à convection forcée. — poisson séché, ----- poisson fumé.

Tous ces séchoirs servaient à traiter du poisson, produit dont le séchage pose le plus de problèmes, étant donné les grandes quantités et l'importance des pertes.

Une enquête socio-économique a été entreprise depuis l'installation des séchoirs. Elle comportait quatre volets : premièrement, le contrôle de la quantité et de la qualité des différents types de poisson vendus; deuxièmement, le suivi de l'utilisation et des rendements de chacun des séchoirs; troisièmement, le suivi parallèle du séchage traditionnel; et quatrièmement le contrôle de la qualité des poissons séchés dans les séchoirs solaires par la méthode traditionnelle.

Cette enquête s'est déroulée de la fin 1983 au milieu de 1984. Elle se poursuit toujours à Sélingué où l'introduction des séchoirs est récente; c'est pour cette raison d'ailleurs que les résultats obtenus à Sélingué ne sont pas inclus dans ce rapport.

Les séchoirs de type TAOST ont bien résisté aux intempéries. Trois d'entre eux fonctionnent toujours parmi les quatre installés à Bêlénitiégny et Sensé-Daga. Le quatrième a été emporté et détruit par une bourrasque de vent à Sensé-Daga. Ils ont donc une durée de vie d'au moins 3 ans sous réserve que l'on change régulièrement la couverture en plastique. À l'utilisation, les problèmes suivants sont apparus : risque de destruction par les coups de vent qui peuvent emporter les séchoirs; incrustation de la poussière dans la chair du poisson causée par les vents de sable; capacité trop faible et claies trop petites ne pouvant pas recevoir les poissons de grande taille.

En aucun endroit les séchoirs de type SERRE n'ont pu atteindre 5 mois de fonctionnement. En effet ils ont tenu 4 mois et demi à Bêlénitiégny, 3 mois à Batamané, et moins de 3 mois à Djidara. On constate que leur durée de vie diminue au fur et à mesure que l'on se déplace vers le Nord du pays où le vent et le soleil sont plus

abondants. Sous l'effet du soleil, le polyéthylène transparent se polymérise et devient cassant; dès lors, il ne peut plus résister aux vibrations provoquées par le vent et se déchire. Le polyéthylène noir résiste beaucoup plus longtemps.

En recouvrant les séchoirs de type SERRE avec de vieux filets de pêche, on réduit l'amplitude des vibrations empêchant ainsi les déchirures qui peuvent apparaître à partir des points de fixation dès le premier jour. Les pêcheurs eux-mêmes nous ont recommandé cette technique. Appliquée à BÉLÉNITIÉGNY, cette technique a permis de porter la durée de vie du plastique transparent à 4 mois et demi au lieu de 3 mois sans l'utilisation de filet. Précisons que les filets autorisés au Mali comportent de grosses mailles et ne posent de ce fait pratiquement aucun problème d'ombrage au séchoir.

Depuis le test de démonstration effectué lors de son installation, le séchoir à convection forcée n'a plus été utilisé par l'Opération Pêche de Mopti à cause de la pénurie de poisson qui a sévi ces dernières années. Avec l'amélioration actuelle de la situation, il faudrait donc faire fonctionner cet équipement afin d'en connaître les rendements techniques et économiques.

Les produits séchés

Les résultats présentés dans le tableau 6 ont été observés à BÉLÉNITIÉGNY de novembre 1983 à février 1984 avec des séchoirs de type TAOST et SERRE. Dans les autres localités, la pénurie de poisson, la faible durée de vie des séchoirs ou les carences de l'enquête n'ont pas permis d'obtenir des résultats utilisables.

Le tableau 6 démontre la bonne acceptabilité des séchoirs solaires par les pêcheurs, car 63 % du poisson a été séché à l'aide de ces derniers et seulement 37 % de façon traditionnelle. De plus, les pêcheurs n'ont jamais cessé de se plaindre de la faible capacité des séchoirs. On constate aussi que du point de vue de la qualité des produits, les séchoirs solaires ont un avantage certain par rapport au séchage traditionnel qui produit 38 % de déchets alors que le séchoir de type SERRE n'en produit que 26 % et le séchoir de type TAOST 30 %.

Cette différence de rendement entre les deux types de séchoirs s'explique par le fait que le séchoir de type SERRE ne comporte qu'une seule claie alors que le séchoir de type TAOST en comporte cinq que le même courant d'air balaie successivement en se chargeant de plus en plus d'humidité.

Selon les interviews avec des pêcheurs, les séchoirs solaires ont les avantages suivants : temps de séchage plus court; meilleure qualité esthétique du poisson séché; poisson non rongé par les insectes, donc plus lourd. Cependant nous n'avons pas pu établir si le poisson séché par voie solaire était plus prisé sur le marché à cause de la faiblesse des échantillons.

Un seul test de reséchage a été effectué sur le séchoir à convection forcée avec à la fois du poisson séché et du poisson fumé. Aux yeux des techniciens de l'Opération Pêche à Mopti, il a été concluant car il a permis : de ramener le taux d'humidité des poissons à un niveau acceptable pour une longue conservation; de débarrasser les poissons des insectes et des larves qui s'y étaient développés;

Tableau 6. Séchage solaire à Béléniégný.

Mois	Séchoir SERRE [A]	Séchoir TAOST [B]	Séchage solaire [A+B]	Séchage traditionnel [C]	Séchage total [A+B+C]
novembre	123,6	73,5	197,1	107,9	305,0
décembre	75,7	36,2	111,9	77,1	189,0
janvier	34,5	13,3	47,8	32,6	80,4
février	20,5	25,7	46,2	11,2	57,4
Total (en kg)	254,3 (40) ¹	148,7 (24)	403,0 (64)	228,8 (36)	631,8 (100)
Poisson séché de mauvaise qualité (en kg)	65,7 (26)	45,3 (30)	111,0 (27)	87,7 (38)	--

1. Les chiffres entre parenthèses sont des pourcentages.

d'obtenir un poisson non cassant et ne sentant pas le mazout comme ceux reséchés dans le four à mazout.

Des essais de plus longue durée auraient permis de faire une comparaison économique entre le séchoir solaire et les fours de reséchage à bois que l'Opération Pêche à Mopti utilise de préférence au four à mazout.

Analyse économique

Cette analyse se fonde sur les prix pratiqués en 1985 et ne concerne que les séchoirs de style TAOST et SERRE. Les quantités séchées annuellement sont extrapolées à partir des données du mois de novembre (tableau 6). On voit que les séchoirs sont nettement sous-utilisés les autres mois.

Du tableau 7 on peut tirer les conclusions suivantes : d'une part, l'utilisation des séchoirs de type SERRE par les pêcheurs se traduirait par une perte énorme pour eux avec la durée de vie actuelle de ces appareils. Cependant, si cette dernière était portée à seulement un an, le séchoir de type SERRE deviendrait rentable; d'autre part, l'utilisation du séchoir de type TAOST est économiquement très rentable. Cet appareil peut s'amortir en moins de 2 ans.

Signalons cependant que ces résultats ont été obtenus dans une situation de pénurie de poisson. Ils peuvent complètement changer en année de pêche normale; il faudrait alors 3 à 4 séchoirs de type SERRE ou 8 à 10 séchoirs de type TAOST par famille. Le coût d'acquisition et l'encombrement des systèmes poseraient alors des problèmes insurmontables aux pêcheurs, surtout avec le séchoir de type TAOST.

Le programme futur de recherche

Il s'articulera autour des trois points suivants.

Consolidation des résultats déjà acquis : Nous envisageons dans ce sens : l'amélioration du séchoir de type SERRE pour une meilleure durabilité et une plus grande flexibilité; la réduction du coût et l'augmentation de la capacité du séchoir de type TAOST par l'utilisation de matériaux localement disponibles; une meilleure connaissance des rendements technico-économiques du séchoir à convection forcée par l'organisation d'une campagne prolongée de tests à Mopti; la réduction du coût des séchoirs à convection forcée par une conception modulaire associant l'utilisation des matériaux locaux et celles de composants standardisés dont on peut industrialiser la production (un effort est déjà entrepris dans ce sens par Dicko (1986) et une meilleure connaissance des conditions d'acceptabilité des séchoirs et de leurs répercussions socio-économiques par l'introduction et le suivi d'un nombre suffisant d'installations en milieu pêcheur et paysan.

Acquisition d'une meilleure connaissance des caractéristiques physiologiques des produits à sécher : Dans ce sens, nous envisageons la réalisation d'un tunnel de séchage muni d'un chauffage électrique, d'une instrumentation adéquate, de systèmes de réglage permettant de faire varier à volonté la température, l'humidité et la vitesse de l'air asséchant. Ceci nous permettra d'établir en laboratoire les meilleures conditions pour le séchage des divers produits.

Tableau 7. Analyse économique.

Paramètres		Séchoir SERRE	Séchoir TAOST
Prix du séchoir (F CFA ¹)		79 000	52 000
Durée de vie (mois)		3	36
Amortissement annuel (F CFA)	[A]	316 000	17 333
Frais d'entretien ² (F CFA)	[B]	31 600	1 733
Charge annuelle (F CFA) [C = A + B]	[C]	347 600	19 066
Quantité annuelle de poisson séché (kg)		714,6	441
Déchets produits	[D]	192,8	132,3
Déchets qui seraient produits par la voie traditionnelle	[E]	281,8	167,6
Économie réalisée ³	[F]		
en kg de poisson [E - D]		89,0	35,3
en F CFA	[G]	148 630	58 951
Bénéfice annuel (F CFA) [G - C]		-198 970	39 885

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

2. Les frais d'entretien sont évalués à 10 % de l'amortissement annuel.

3. Le prix du poisson séché était de 1 670 F CFA/kg à San en 1985.

Séchage de nouveaux produits : Nous nous intéresserons aux produits insuffisamment testés, comme les fruits et légumes, ou non encore testés, comme le tabac et les céréales, afin de proposer aux agents économiques non pas seulement des séchoirs solaires, mais des procédés complets incluant les prétraitements éventuels et les méthodes de stockage.

Le programme futur de recherche ainsi défini prévoit une plus grande utilisation des moyens informatiques à des fins de modélisation et de simulation.

Conclusion

Le contexte climatique du Mali se prête bien à la pratique du séchage qui est appliqué depuis les temps immémoriaux à un grand nombre de produits. Malheureusement, les méthodes traditionnelles utilisées entraînent des pertes souvent énormes et donnent des produits finis de qualité hygiénique laissant à désirer. Les

recherches menées jusqu'à présent ont permis la mise au point de séchoirs solaires à convection naturelle et à convection forcée techniquement bien adaptés au séchage du poisson, des fruits et des légumes.

L'expérimentation sur le terrain de ces séchoirs n'est pas suffisante pour donner des résultats définitifs; elle a cependant mis en évidence certaines insuffisances tant sur le plan technique qu'économique : faible capacité, coût élevé, faible durabilité, etc. Mais elle a démontré une bonne acceptation des séchoirs solaires en milieu pêcheur.

Le programme futur de recherche prévoit la consolidation des résultats déjà acquis, notamment par la réduction des coûts et l'utilisation des matériaux locaux, une meilleure connaissance des caractéristiques physiologiques des produits à sécher, ainsi que l'élaboration de procédés complets pour des produits insuffisamment étudiés ou non encore étudiés.

En conclusion on peut affirmer d'une part que la faisabilité technique du séchage solaire est démontrée pour certains produits, elle reste à prouver pour d'autres; d'autre part, l'impact socio-économique des séchoirs solaire demande encore beaucoup d'investigations pour être connu.

Bibliographie

- Dembele, S.X. 1982. Séchage solaire de la mangue : quelques résultats. Laboratoire de l'énergie solaire (LESO), Bamako, Mali. Rapport interne.
- _____ 1985. Évaluation des séchoirs solaires à BÉlénitiégn (SAN) et Djidara (GAO). Laboratoire de l'énergie solaire, Bamako, Mali. Rapport interne.
- Dicko, M. 1985. Projet de séchage solaire du poisson à Mopti. Communication présentée à l'"International Conference on R&D of Renewable Energy Technologies in Africa", Réduit, Île Maurice, 31 mars au 5 avril 1985.
- _____ 1986. Faisabilité technico-économique du séchage solaire au Mali. Thèse de docteur-ingénieur présentée à l'Université de Perpignan, France, juillet 1986.
- Duffie, J.A., Beckman W.A. 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley and Sons.
- Traore, C.O. 1982. Les produits couramment séchés, LESO, Bamako, Mali. Rapport interne.
- _____ 1982. Les séchoirs à convection naturelle, LESO. Rapport interne.

POSSIBILITÉS ET ÉTUDES DE RENDEMENT DES SÉCHOIRS SOLAIRES DE RÉCOLTES À L'ÎLE MAURICE

Y.K.L. Yu Wai Man¹

Résumé — L'auteur présente une étude des possibilités d'utilisation des séchoirs solaires comme solutions de rechange aux méthodes traditionnelles de séchage à l'air libre et comme moyens de compléter les séchoirs artificiels afin de conserver les excédents de produits agricoles. Une évaluation de l'énergie solaire disponible à l'Île Maurice révèle que l'on pourrait sécher diverses récoltes dans les séchoirs solaires de la plupart des régions pendant l'année. Cette communication décrit et expose les résultats d'expériences effectuées sur deux séchoirs solaires à l'aide de récoltes de maïs, d'arachides et de riz. Les deux séchoirs fonctionnaient par convection forcée, le premier utilisant un courant d'air ascensionnel et l'autre, un débit d'air dans la direction opposée. Dans ce dernier cas, on compare le rendement du séchoir avec divers matériaux absorbeurs d'énergie comme du gravier basaltique et du bois dur. D'après les résultats obtenus, une évaluation techno-économique de l'un des séchoirs nous a révélé les divers avantages que l'on pouvait tirer de l'emploi d'un tel séchoir.

Introduction

Dans le passé, les agriculteurs à l'Île Maurice ont toujours pratiqué la monoculture. Cependant, le gouvernement a récemment décidé de mettre l'accent sur la polyculture. En vertu de son programme d'autonomie, il a décidé de libérer, dans un premier temps, 800 ha des meilleures terres arables à la production de cultures vivrières et, pour accroître davantage la production, de procéder au sarclage intercalaire des 80 000 ha de champs de canne à sucre. Le plan d'action du gouvernement (Île Maurice, 1983) prévoit la production immédiate d'au moins 10 grandes cultures, dont le maïs est la plus importante (tableau 1). Toutes ces cultures doivent être séchées pour éviter qu'elles ne se détériorent pendant leur entreposage subséquent. Bien que certaines cultures ne soient récoltées que pendant de courtes périodes bien définies, d'autres le sont toute l'année, rendant ainsi essentiel le recours au séchage permanent (fig. 1).

Les grands propriétaires terriens qui participeront au programme de diversification agricole utiliseront généralement le procédé établi de séchage artificiel. Cependant, les 1 200 petits agriculteurs qui seront également appelés à participer ne pourront évidemment pas se

1. Université de l'Île Maurice, Réduit, Île Maurice.

Tableau 1. Objectifs de production de cultures pour 1987 prévus dans le programme d'autonomie.

Culture	Production (t)	
	Objectif du programme	Quantité actuelle
Maïs	15 000	6 000
Riz	6 000	800
Oignons	4 300	3 500
Arachides	2 500	2 000
Gingembre	2 000	450
Fèves et pois	1 600	1 100
Ail	450	350
Curcuma	230	160
Piments	225	50
Café	80	40

Culture	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Maïs	---						-----					
Riz				-----								-----
Oignons							-----					
Arachides	-----											
Gingembre	-----											
Fèves et pois							-----					
Ail						-----						
Curcuma	-----											
Piments	-----											

Fig. 1. Périodes de récolte des diverses cultures.

permettre de recourir à ce processus coûteux de sorte qu'ils devront s'en remettre au séchage à l'air libre. Toutefois, le séchage à l'air libre comporte plusieurs contraintes importantes, l'une, mais non la moindre, étant l'impossibilité de diminuer la teneur en eau au niveau désiré pour garantir un bon entreposage et ce, pour tous les produits. Par exemple, le taux d'humidité du maïs séché à l'air libre ne peut descendre en deçà de 14 %, ce qui oblige à procéder à un second séchage artificiel pour atteindre le taux de 12 % requis pour l'entreposage.

Cette communication examine donc les possibilités du séchage solaire des récoltes dans l'île et décrit les études d'expérimentation et de développement effectuées sur deux séchoirs solaires.

Disponibilité de l'énergie solaire

L'île Maurice est une petite île d'une superficie de 1 865 km² qui est située par environ 20° de latitude sud et 57° de longitude

est. L'île jouit d'un climat maritime uniforme mais est souvent balayée par des cyclones pendant l'été (de novembre à mars). Malgré tout, elle bénéficie d'un rayonnement solaire assez abondant pendant l'année. Les services météorologiques de l'Île Maurice (1972) s'occupent de consigner les données climatiques et un récent rapport (Vaghjee, 1981) indique que le rayonnement solaire global incident sur les différentes régions de l'île (fig. 2) fluctue généralement entre 2,5 et 6,5 kWh/m² par jour. L'insolation varie de 5,0 à 6,2 kWh/m² par jour en été et de 3,2 à 3,6 kWh/m² par jour en hiver, pour une moyenne journalière de 4,5 kWh/m² (fig. 3a).

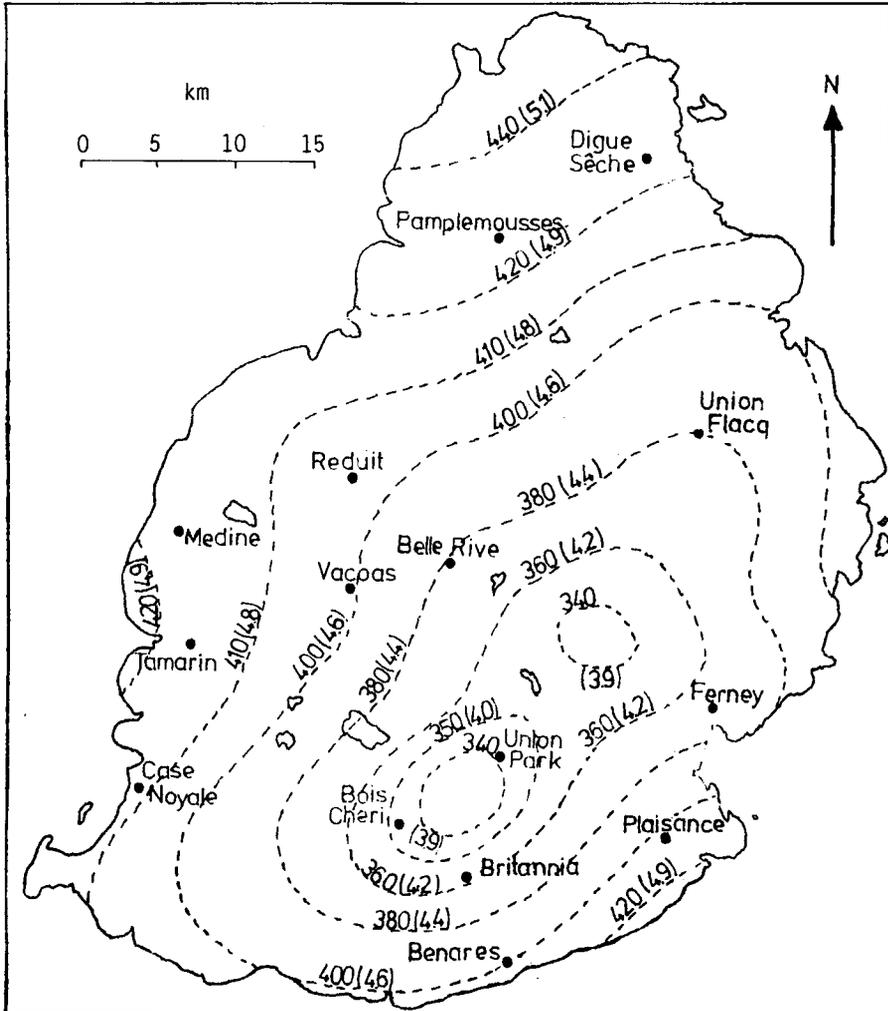


Fig. 2. Moyenne quotidienne du rayonnement solaire global annuel (en calories/cm² par jour et en kWh/m² par jour), à l'Île Maurice.

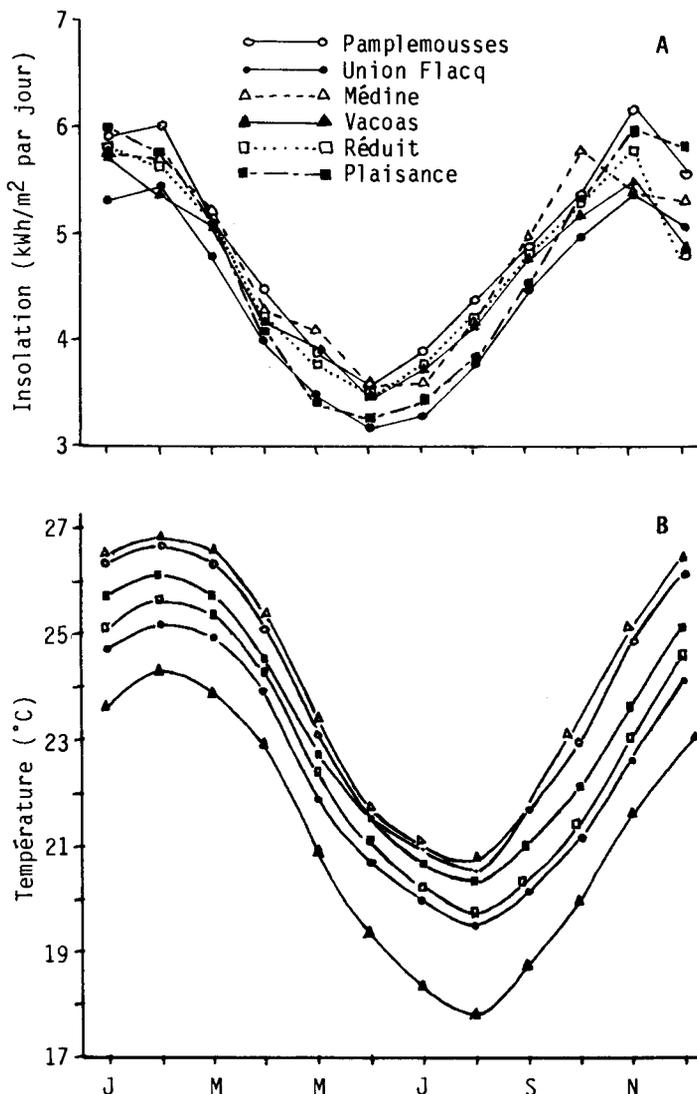


Fig. 3. Intensités (a) du rayonnement solaire global et fluctuation annuelle de la température journalière moyenne de l'air (b).

Lorsqu'on évalue l'énergie solaire potentielle aux fins du séchage, il faut tenir compte avant tout du fait que l'île reçoit un fort taux d'ensoleillement ininterrompu pendant la majeure partie de la journée. En moyenne, le soleil brille 7 heures par jour pendant toute l'année. Cela représente plus de 2 500 heures d'ensoleillement. Les données indiquent que le Nord de l'île reçoit environ 3 300 heures de soleil, l'Ouest, le Sud et le plateau central environ 2 600 heures et l'Est, environ 2 400 heures par an. La température de l'air ambiant, qui est fonction de l'ensoleillement reçu, varie selon

les régions (fig. 3b), la température moyenne maximum atteignant entre 24° et 27°C en été et la température minimum, entre 18° et 21°C en hiver. L'humidité relative ambiante est généralement élevée durant toute l'année, fluctuant de 60 % jusqu'à un maximum de 95 %. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 900 à 2 500 mm.

Ces données indiquent clairement l'immense potentiel solaire qui pourrait être exploité pour fournir la totalité ou partie de l'énergie nécessaire au séchage d'un grand nombre de produits agricoles. Étant donné que la facture actuelle de 20 millions RM (un dollar américain (\$ US) = 14,3 roupies mauriciennes (RM)) pour le séchage artificiel des récoltes est beaucoup trop élevée pour l'île, il est impératif d'effectuer des recherches sur l'utilisation des séchoirs solaires comme méthode de remplacement des séchoirs artificiels.

Description des séchoirs solaires

Les expériences ont eu lieu sur deux séchoirs solaires à convection forcée. Les deux séchoirs diffèrent dans la manière dont l'air chaud circule des réchauffeurs d'air jusque dans la chambre de séchage.

Séchoir I

Le séchoir I (fig. 4) est un prototype d'une conception semblable à celle mise au point par Excell (1980), mais ses matériaux de construction sont différents. La structure du séchoir reposait sur des blocs de ciment de 200 mm, eux-mêmes disposés sur une plate-forme de béton de 50 mm de hauteur. Cette configuration laissait donc un espace d'air entre la plaque du capteur et le sol afin de réduire au minimum les pertes de chaleur vers le sol.

La surface absorbante était faite de tôle galvanisée unie (calibre 22) revêtue d'une couche de peinture noir mat et avait 23 m². Le capteur était immobilisé dans une ossature horizontale de tiges en acier doux. La couverture du capteur se composait de 16 vitres claires (1,2 m x 0,95 m x 4 mm) insérées dans une structure d'acier doux inclinée de 20° par rapport à l'horizontale. Un joint de mastic métallique assurait l'étanchéité entre les vitres et le cadre. À l'extrémité inférieure du capteur était aménagée une entrée d'air (4,8 x 0,1 m).

L'enceinte de séchage comprenait quatre claies (1,2 m x 1,0 m x 0,3 m) à ossature de fer; les parois étaient faites de tôle et le fond, d'un treillis galvanisé très fin. Chaque claie pouvait recevoir jusqu'à 125 kg de produits agricoles humides. Les deux portes de métal qui donnaient accès à la chambre de séchage étaient isolées avec des panneaux de particules recouverts d'une peinture à base de bitume. La cheminée (0,3 m x 0,26 m x 1 m de hauteur) était faite de tôle peinte en noir. Les parois latérales du séchoir se composaient de deux tôles galvanisées peintes en noir.

Les premiers essais de séchage ont eu lieu en mode de convection naturelle mais on a plus tard incorporé un ventilateur centrifuge pour assurer une convection forcée. Le ventilateur fonctionnait à l'aide d'un moteur électrique (900 t/m, 120 W, 240 V) pouvant déplacer 25 m³ d'air à la minute. Deux déflecteurs incurvés ont été aménagés dans la

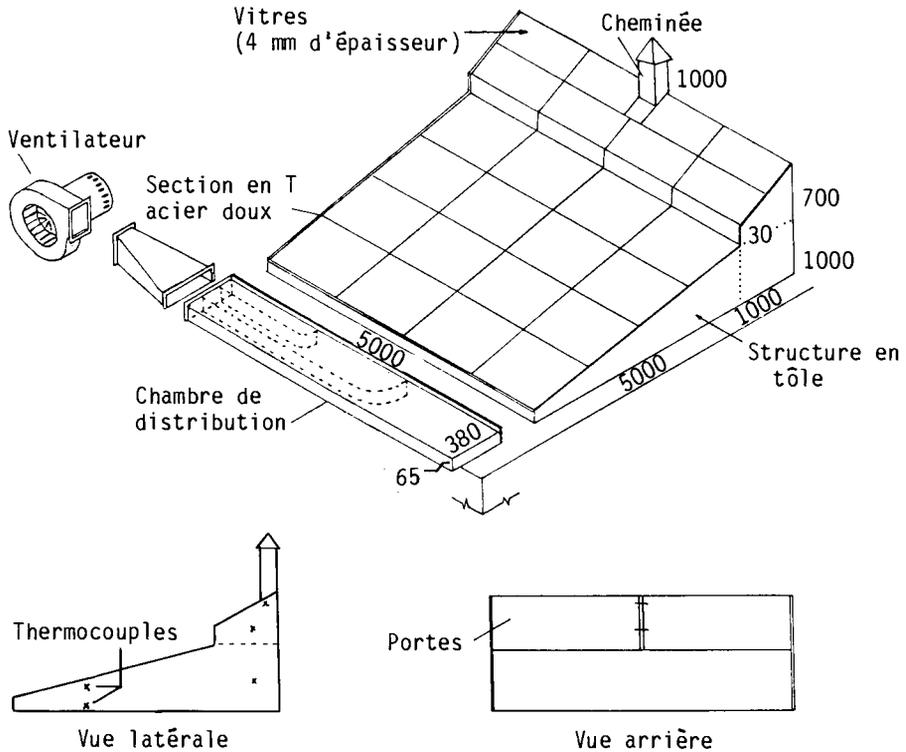


Fig. 4. Prototype expérimental du séchoir I (les dimensions sont en millimètres).

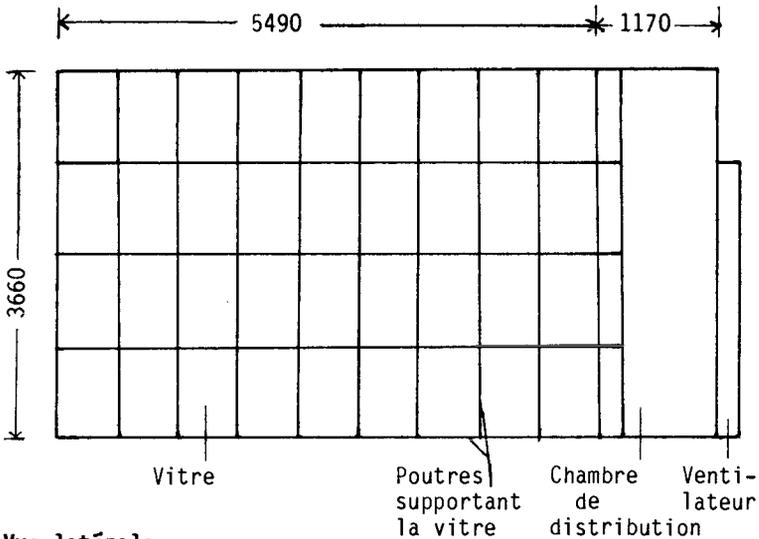
chambre de distribution (dimensions intérieures de 380 mm x 65 mm) pour permettre une circulation d'air uniforme à travers le capteur solaire.

Séchoir II

Le séchoir II, qui servait commercialement à sécher de petites quantités de fruits et de croustilles de pâte-pommes de terre (chipec), a été construit avec des blocs de béton de 150 mm reposant sur une fondation de béton (fig. 5 et 6). L'absorbeur de chaleur, orienté au nord et incliné de 20° par rapport à l'horizontale, se composait d'une couche de roches basaltiques naturelles de 50 mm d'épaisseur étalée sur un contre-plaqué de 4 mm peint en noir (fig. 6b). La surface de captage totalisait 20 m². L'isolation était assurée par un polystyrène de 25 mm étendu sur la base de béton. L'espace sous le béton a été rempli de cailloux. Des poutres préfabriquées supportaient le cadre métallique des fenêtres dans lesquelles une vitre de 4 mm avait été placée.

La chambre de séchage avait des murs de blocs de béton et quatre portes en acier galvanisé donnant accès aux 40 claies (fig. 6a). Chaque claie se composait d'un cadre de bois et d'un treillis en nylon

Plan



Vue latérale

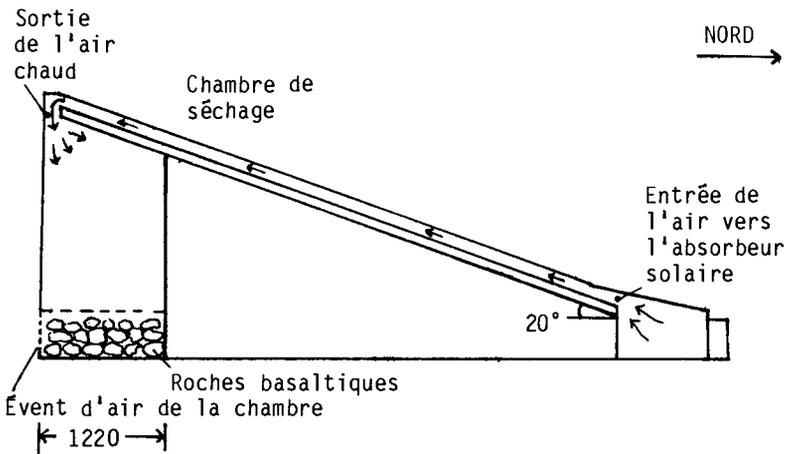
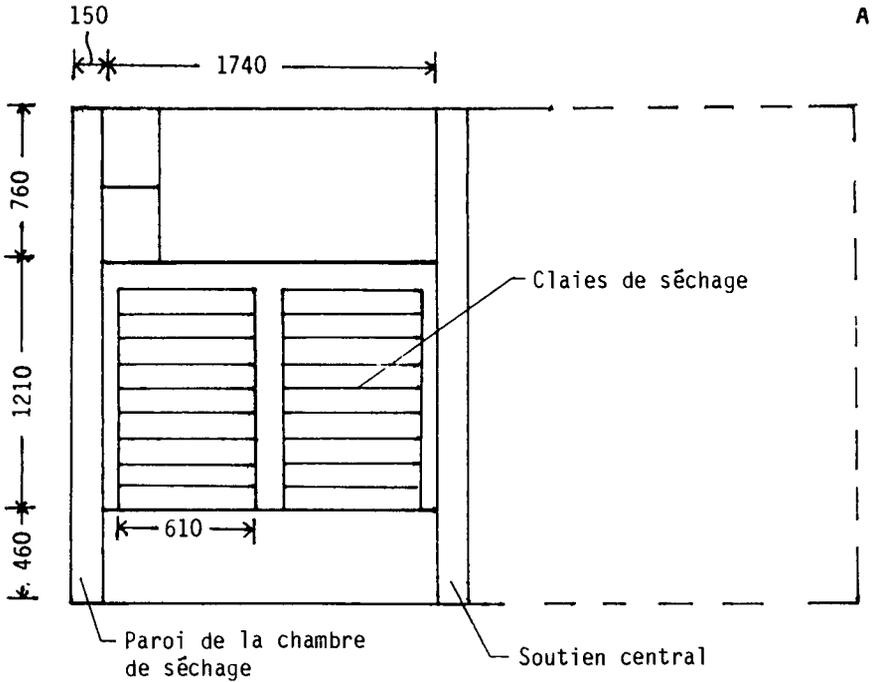


Fig. 5. Séchoir II : Plan et vue latérale (les dimensions sont en millimètres).

sur lequel les produits à sécher étaient déposés. Les claies (chacune mesurant 610 mm x 1 220 mm) ont été superposées à 100 mm l'une de l'autre, celles du bas se trouvant à 460 mm au-dessus du plancher de la chambre de séchage. Le séchoir pouvait recevoir jusqu'à 100 kg de produits humides. Sous la dernière claie se trouvait un espace vide et la sortie d'air (fig. 5b). L'espace vide pourrait être rempli de roches basaltiques pour retenir la chaleur.



B

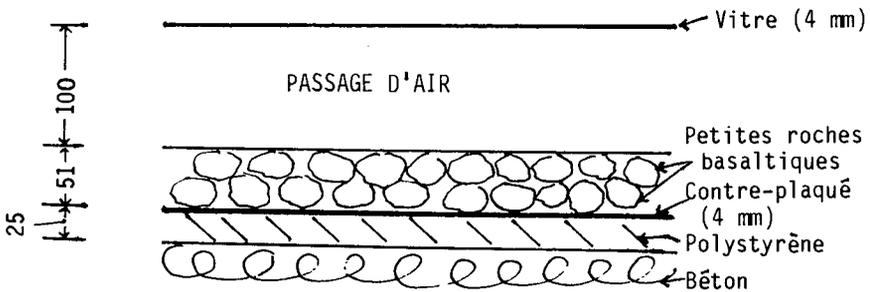


Fig. 6. Séchoir II : Vue latérale de la chambre de séchage avec une porte ouverte (a) et vue en coupe de l'absorbeur de chaleur (b) (les dimensions sont en millimètres).

La chambre de distribution, construite en blocs de béton et recouverte d'une tôle galvanisée légèrement inclinée, renfermait un ventilateur qui assurait la ventilation forcée du séchoir. Le cycle se faisait comme suit : l'air était poussé dans l'espace entre la vitre et l'absorbeur où il était réchauffé, puis il entrait par le haut de la chambre de séchage pour passer au travers des claies. Au bas de la chambre, l'air était encore assez chaud pour pouvoir réchauffer les roches basaltiques. Pendant la nuit, l'énergie accumulée dans les roches permettait de conserver une certaine chaleur dans le séchoir, évitant ainsi la formation de moisissure.

Résultat des expériences et discussion

Séchoir I

Dans le séchoir I, la chambre de séchage à vide pouvait atteindre une température moyenne de 22°C au-delà de la température ambiante (fig. 7a). Selon les calculs, le rendement du capteur solaire a varié d'un minimum de 34 % à un maximum de 45 %.

Plusieurs essais de séchage avec des épis de maïs, des arachides et du riz (de 100 kg à plus de 300 kg) ont eu lieu dans le séchoir, en recourant tantôt à la convection naturelle, tantôt à la convection forcée. Comme on pouvait s'y attendre, l'augmentation de température dans la chambre de séchage dépendait du taux d'ensoleillement (fig. 8) et elle était habituellement plus élevée lorsque l'air circulait dans le séchoir par convection naturelle (fig. 7b et c).

Pour à peu près la même intensité moyenne du rayonnement solaire, la convection forcée a donné de meilleurs résultats que la convection naturelle (fig. 9). Bien que la teneur initiale en eau du maïs au début de l'essai n'était pas la même, les différents gradients des courbes de séchage révèlent que la perte d'eau en convection forcée était plus élevée qu'en convection naturelle. Toutefois, le temps de séchage des arachides a été presque identique dans les deux modes de fonctionnement du séchoir. Cela s'explique par la masse différente des arachides à sécher et par les conditions climatiques qui n'étaient pas semblables d'un essai à l'autre.

Le tableau 2 résume les conclusions des divers essais effectués dans le séchoir I. On a calculé le rendement global du séchoir en partant de l'énergie totale qu'il fallait apporter pour ramener au niveau désiré la teneur en eau d'une quantité donnée de produits, ainsi que d'après le rayonnement solaire incident sur l'absorbeur du capteur. En convection forcée, le rendement s'est établi entre 11 % et 18 % comparativement à 7 % - 14 % en convection naturelle.

Séchoir II

Le séchoir II était utilisé à des fins commerciales mais il n'a pas été possible d'en établir le rendement exact à cause d'un manque d'instruments appropriés. Toutefois, l'observation des températures à l'intérieur de la chambre de séchage ainsi que de la diminution de poids des produits pendant les essais nous donnent une bonne idée des caractéristiques du séchoir. Avec un séchoir à vide, on a pu obtenir une hausse moyenne quotidienne de température de 13°C par rapport à la température ambiante (fig. 10a). Dans la chambre de séchage, on a relevé des températures maximum de 48°C, pour une élévation de température de 16°C. Une fois chargé de 20 kg de mangues tranchées, l'augmentation de température pendant la première journée de séchage a été inférieure (fig. 10b) à cause d'une diminution du rayonnement solaire moyen. À la fin de la journée (à 17 h), on a retourné les tranches pour la nuit en fermant toutefois le ventilateur. Pendant la deuxième journée de séchage, on a pu obtenir une élévation de température de l'air allant jusqu'à 17°C. Il aura fallu 20 heures de séchage solaire pour faire perdre aux mangues plus de 60 % de leur masse initiale (fig. 10c).

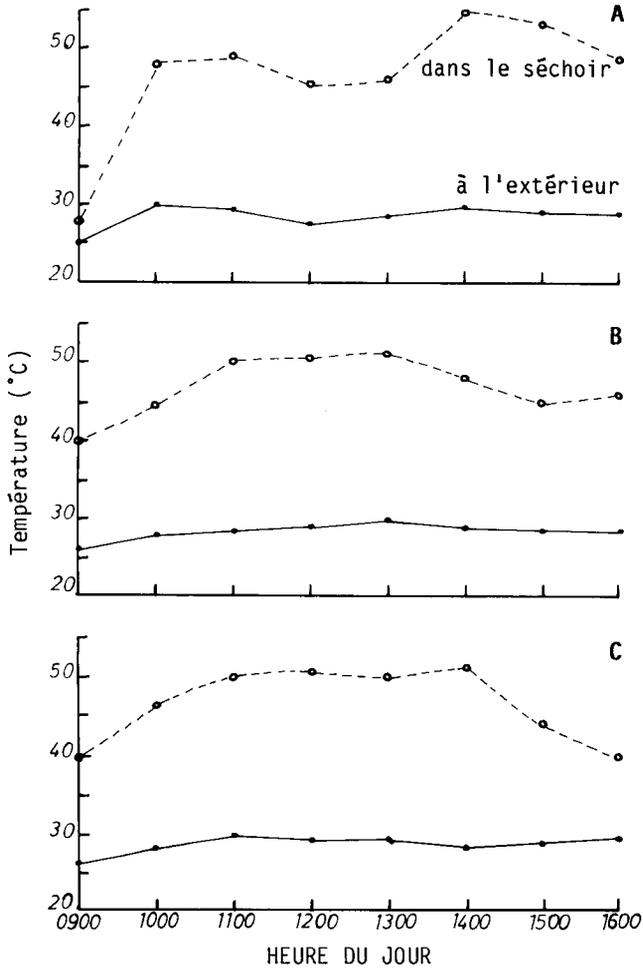


Fig. 7. Séchoir I : fluctuations de température pendant une journée typique : séchoir à vide (a) et chargé de maïs avec circulation naturelle (b) et circulation forcée (c) de l'air.

Les essais avec des croustilles de pommes de terre nous ont révélé qu'il fallait généralement deux jours pour diminuer leur masse initiale de 50 % et deux jours supplémentaires, selon l'ensoleillement, pour en abaisser le poids à près de 10 % de leur masse initiale. Du fait que les produits avaient été laissés dans la chambre pour la nuit, de la moisissure est apparue sur certaines claies lorsque le taux d'humidité relative de l'air a augmenté à près de 100 %. Il était donc clair que pour éviter la dégradation des produits qui nécessitaient plus d'une journée de séchage, il fallait maintenir l'humidité relative de l'air en deçà de 80 %. On peut y arriver en fermant complètement le séchoir après le coucher du soleil et en faisant appel à une source artificielle de chaleur. Le réchauffeur est constitué de plusieurs parois que l'on pourrait

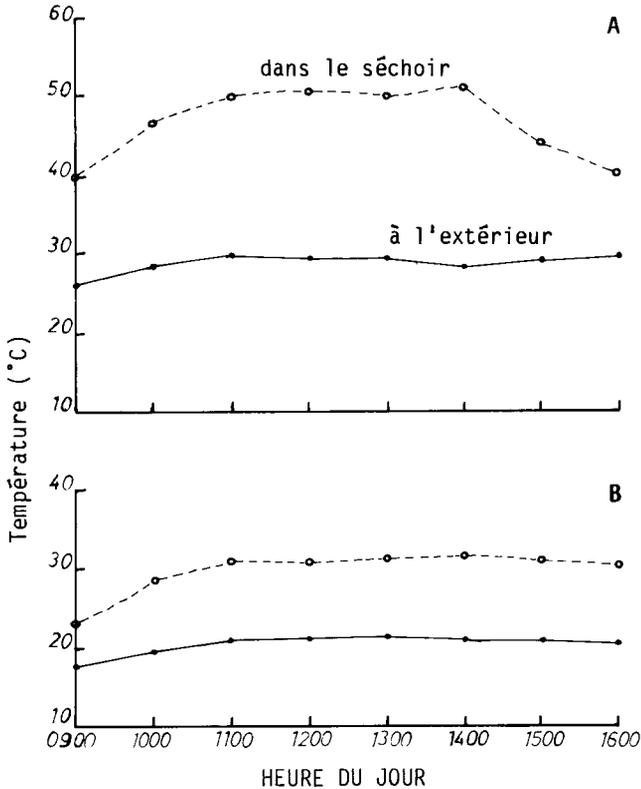


Fig. 8. Séchoir I : effet de l'intensité du rayonnement solaire moyen, 625 W/m² (a) et 377 W/m² (b), sur la température.

éliminer par l'installation d'un système d'entreposage de la chaleur dans le séchoir.

Le séchoir II à circulation descendante se prête très bien à l'entreposage de la chaleur lorsqu'on récupère la chaleur perdue pour réchauffer des roches basaltiques peintes en noir qui sont placées sous la chambre de séchage. Avec un tel système, on peut maintenir la température de la chambre pendant toute la nuit jusqu'au lever du soleil (fig. 11).

Effet de différents matériaux absorbants sur les températures

On a effectué une étude préliminaire pour déterminer l'effet de différents matériaux absorbants sur la température de la chambre du séchoir II à vide. Avec un gravier basaltique, on a pu obtenir une augmentation moyenne de la température de 13°C dans la chambre lorsque le rayonnement solaire moyen atteignait 447 W/m². Les capteurs affichaient donc à ce moment un rendement d'environ 41 %, ce qui est assez près de celui réalisé avec une tôle galvanisée peinte en noir dans le séchoir I. Lorsqu'on enlevait le gravier basaltique pour ne laisser que le contre-plaqué de 4 mm peint en noir, l'augmentation moyenne de température dans la chambre, sous un rayonnement solaire

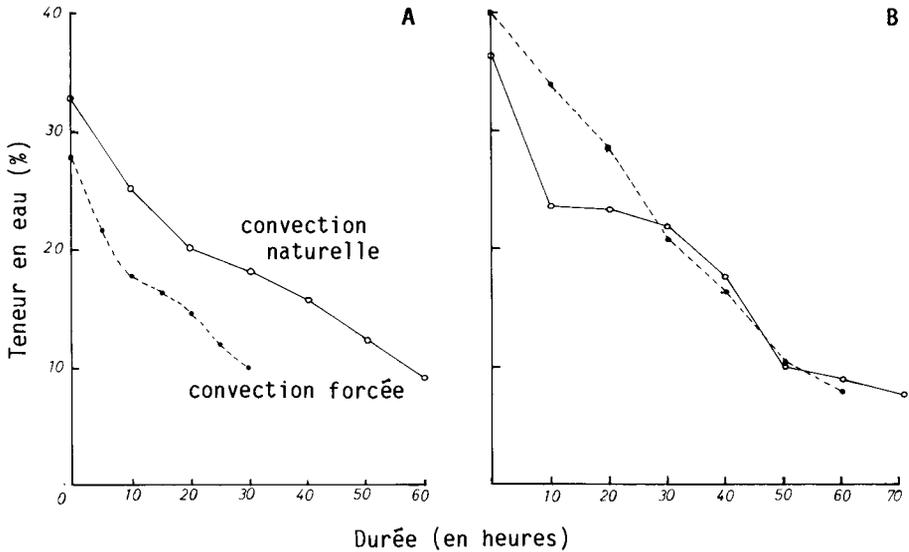


Fig. 9. Séchoir I : courbes de séchage du maïs (a) et des arachides (b) en convection naturelle et forcée. (Nota : Les essais sur les deux cultures n'ont pas eu lieu le même jour).

moyen global de 326 W/m^2 , atteignait 8°C , le rendement du capteur tombant alors à 34 %. L'enlèvement du gravier basaltique a toutefois accru de 50 % le passage d'air entre la vitre et le contre-plaqué.

Ces résultats nous laissent croire que le gravier basaltique, peu coûteux et facilement disponible sur le marché local, pourrait servir à remplacer les tôles galvanisées plus dispendieuses.

Considérations financières

Le séchoir I avait été conçu et construit uniquement pour l'expérience, de sorte que son coût d'environ 15 000 RM est élevé. Les frais d'exploitation annuels dépendent de la période d'utilisation du séchoir et s'échelonnent entre 2 700 et 3 000 RM pour des durées respectives d'exploitation de 6 et 12 mois. En supposant une capacité de 300 kg de produits tous les 4 jours, on pourrait facilement sécher 27 t en un an.

Une analyse coût-avantages révèle que le coût du prototype de séchoir pourra être récupéré en 2,0 ou 5,5 ans pour une durée respective d'exploitation de 12 et 6 mois par année si l'on suppose que le coût de séchage d'une tonne de maïs dans un séchoir industriel s'élève à 400 RM.

Problèmes liés au développement et à l'utilisation des séchoirs solaires

Le principal obstacle au développement d'une technologie solaire appliquée au séchage des récoltes réside dans la mise de fonds

Tableau 2. Récapitulation des expériences de séchage.

Cultures	Produits frais (kg)	Produits séchés (kg)	Énergie solaire recueillie (MJ)	Électri- cité consommée (kWh)	Rendement du séchoir (%)
<u>Convection naturelle</u>					
Épis de maïs	104	85	792	--	6,9
Épis de maïs	78	56	715	--	8,4
Arachides	157	110	1 218	--	10,8
Arachides	200	132	1 352	--	14,0
<u>Convection forcée</u>					
Riz	274	219	1 408	4,8	11,4
Riz	227	194	703	2,9	13,2
Maïs épluché	200	156	1 008	4,8	12,1
Épis de maïs	339	248	1 680	4,8	15,2
Épis de maïs	156	119	584	2,9	17,9
Arachides	327	215	2 088	6,0	15,1

importante qu'il faut affecter à l'achat du séchoir solaire. En outre, certaines cultures qui sont récoltées sur de courtes périodes (habituellement quelques semaines) ne peuvent souvent subir un délai avant d'être séchées. Le séchoir ne sera donc utilisé que pendant une durée relativement courte. Un autre problème à l'Île Maurice tient au fait que les petits agriculteurs produisent diverses cultures pendant toute l'année sous des conditions climatiques qui fluctuent constamment. N'importe quel séchoir devrait donc convenir au séchage de toutes les cultures. Qui plus est, à cause des variations du climat et de l'insolation, le séchoir doit être bien isolé et étanche à l'air pour éviter les pertes thermiques. Il pourrait aussi se révéler nécessaire d'entreposer la chaleur pour empêcher les produits de réabsorber l'humidité de la nuit. C'est particulièrement important dans le cas des cultures fortement gorgées d'eau que l'on doit déshydrater rapidement pour éviter toute activité microbienne pouvant favoriser l'apparition de moisissure. Même s'il n'y a aucune formation de moisissure, le produit doit être réchauffé pendant 3 ou 4 heures le lendemain matin pour éliminer l'humidité absorbée pendant la nuit. Cela représente un gaspillage de 3 à 4 heures d'énergie solaire chaque jour lorsqu'on ne peut recourir à un système de récupération de la chaleur.

Conclusions

Selon une évaluation de l'énergie solaire disponible à l'Île Maurice, on pourrait sécher une gamme de récoltes dans la plupart des régions pendant toute l'année. Les études expérimentales effectuées sur deux séchoirs nous ont indiqué, dans une certaine mesure, les nombreux avantages du séchage solaire.

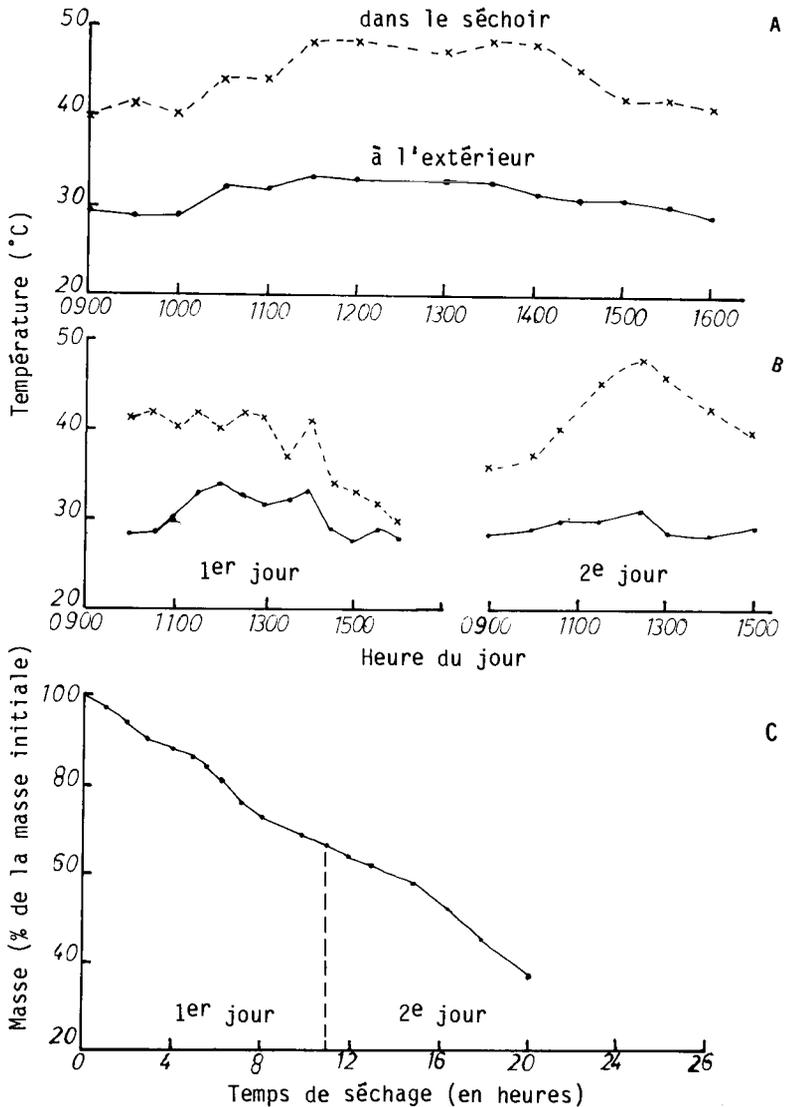


Fig. 10. Séchoir II : température dans le séchoir à vide (a) et chargé de fruits tranchés (b) et courbe de séchage des fruits tranchés (c). On remarque que le taux de séchage a été mesuré entre 7 h et 18 h le premier jour et entre 7 h et 16 h le deuxième jour.

Les résultats obtenus avec du gravier basaltique comme absorbeur de chaleur illustrent son utilité comme solution de recharge à la tôle galvanisée plus coûteuse. On a aussi vu qu'il était important d'intégrer au séchoir un système de stockage de la chaleur lorsque le séchage du produit s'étendait sur plus d'une journée.

Remerciements -- Les études effectuées sur le séchoir I ont été rendues possibles grâce à une subvention à la recherche de la British Overseas Development Administration, par le biais du Commonwealth

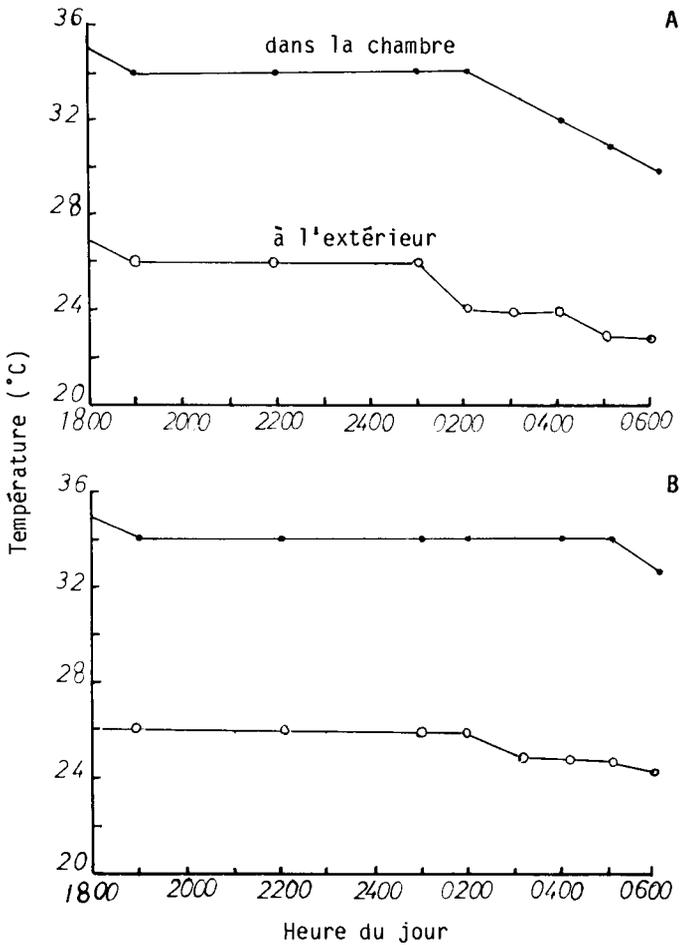


Fig. 11. Sêchoir II : température à vide sans entreposage de la chaleur (a) et avec entreposage de la chaleur (b).

Science Council, dans le cadre du programme de l'énergie en Afrique. J'exprime toute ma gratitude à ces organismes ainsi qu'à Food Cannery Ltd. (Île Maurice) qui nous a fourni les renseignements sur le sêchoir II. Nous remercions également le ministère de la Planification et du Développement économiques ainsi que l'Université de l'Île Maurice d'avoir mis leurs installations à notre disposition. Enfin, nous sommes redevables au ministère de l'Agriculture et à l'Institut de recherche de l'industrie sucrière de l'Île Maurice des documents qu'ils nous ont fournis.

Bibliographie

Excell, R.H.B. 1980. A simple solar rice dryer: basic design theory. *Sunworld*, 4(6), 186-190.

- Maurice, gouvernement de l'Île. 1983. Livre blanc sur la diversification agricole. Gouvernement de l'Île Maurice, Port Louis.
- Services météorologiques de l'Île Maurice. 1972. Le climat de l'Île Maurice. Services météorologiques de l'Île Maurice, Vacoas, Île Maurice.
- Vaghjee, R.R. 1981. Répartition du rayonnement solaire à l'Île Maurice. Services météorologiques de l'Île Maurice, Vacoas, Île Maurice. Rapport technique.

CONCEPTION ET ESSAIS DE SÉCHOIRS SOLAIRES POUR ALIMENTS AU NIGER

Yahaya Yaou, Zabeïrou Radjikou et Jean-Marc Durand¹

Résumé — Après avoir présenté l'Office national de l'énergie solaire (ONERSOL), les auteurs décrivent la situation du séchage solaire au Niger et plus spécifiquement ses applications pour la viande. Les objectifs du séchage solaire sont définis : protection contre les insectes et les poussières, atteinte d'une teneur en eau de 65 % à la fin de la première journée. Les divers prototypes réalisés depuis 1980 sont succinctement décrits et critiqués. Une expérimentation simultanée de cheminées a permis d'adopter une cheminée à grande section de passage. Les auteurs expliquent ensuite la conception du séchoir SAHEL 50 qui peut sécher 40 kg de viande en deux jours. À cette occasion est développée l'idée de réduction de la section d'entrée de l'air le deuxième jour, ce qui accélère le processus en élevant la température, ce qui n'est d'ailleurs pas dommageable pour la viande. En annexe, les auteurs abordent les problèmes d'instrumentation et décrivent une expérience de séchage de kilichi qui a démontré que le séchage solaire peut garantir une bonne qualité bactériologique du produit.

L'ONERSOL

L'Office national de l'énergie solaire (ONERSOL) est un établissement public de l'état, créé le 15 mai 1965. Il est placé sous la tutelle du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Il a pour mission de mener une recherche appliquée dans le domaine de l'énergie solaire, notamment la mise au point de divers prototypes d'appareils dont le fonctionnement dérive de l'énergie solaire et d'effectuer des mesures du rayonnement solaire. En 1975, son acte constitutif a été élargi pour inclure la fabrication et la commercialisation d'appareils solaires. Il dispose d'un budget modeste (37 millions de F CFA² en 1986) et emploie un personnel de 35 agents.

Les projets en cours sont les suivants : amélioration du capteur et chauffe-eau de l'ONERSOL; mise au point du moteur thermodynamique ONERSOL-SPILLING; production d'énergie électrique avec des piles photovoltaïques dans les conditions de concentration et le séchage solaire (le département séchage a été créé en 1980 suite à un contrat

1. Office national de l'énergie solaire, Niamey, Niger.

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

de recherche signé entre l'ONERSOL et le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) sur un projet de séchage solaire des oignons).

Le séchage des aliments

Séchage traditionnel

Oignons - La production nationale d'oignons frais est très importante (110 000 t en 1983). Elle progresse depuis l'avènement des cultures de contre-saison. Cette production est destinée pour 80 % à l'exportation, mais les possibilités de vente de l'oignon séché à l'étranger sont inconnues. À l'intérieur du pays, l'oignon sec n'est consommé qu'à Niamey, où il est vendu à bas prix parce qu'il provient d'oignons qui avaient commencé à pourrir.

Tomates - Chaque année, environ 25 000 t de tomates fraîches sont produites. Une infime partie est directement utilisée dans les sauces. Compte tenu de sa rapide dégradation, partout au Niger la surproduction est séchée et pilée pour la même utilisation que ci-dessus. Il n'y a pratiquement aucun problème d'écoulement car la demande est assez importante et la tomate séchée se conserve longtemps. Les périodes de récolte correspondent à des périodes favorables au séchage à l'air libre. Les conditions d'hygiène sont acceptables.

Gombos concombres - Leur production est difficilement estimable car les surfaces cultivées sont petites et très dispersées pratiquement à travers tout le pays. Ils sont séchés et pilés pour l'utilisation dans la sauce.

Viande - L'élevage est la principale activité des éleveurs peulhs et la seconde des paysans. Malgré la persistance de la sécheresse, cette activité représente une importante source de devises. Le Niger exporte des animaux et de la viande vers les pays voisins. Le découpage de la viande en lamelles, son séchage à l'air libre suivi d'un assaisonnement et d'un second séchage donne un produit très prisé localement qui s'appelle le kilichi. Il est produit sur l'étendue du territoire dans les villes et villages. Relativement cher, il est de qualité hygiénique pas toujours satisfaisante.

Débouchés possibles du séchage solaire

Oignons : La cuisine nigérienne n'utilise presque exclusivement que de l'oignon frais. Les possibilités de vente des oignons secs à l'étranger sont inconnues. De ce fait, l'oignon ne représente pas pour le moment un débouché possible pour le séchage solaire.

Tomates : Séchée et conservée traditionnellement sans dommage, elle ne peut présenter un débouché pour le séchage solaire, qui ne serait pas concurrentiel compte tenu de la saison de récolte et de séchage.

Viande : Compte tenu du volume de la demande, la viande représente un débouché pour le séchage solaire au Niger, mais à condition de trouver un partenaire intéressé par la commercialisation d'une viande séchée de qualité pour le marché local et l'exportation.

Conditions climatiques et séchage au Niger

Nous prenons l'exemple de Niamey qui est assez représentatif au Niger. Les figures 1, 2 et 3 nous donnent les évolutions des facteurs climatiques déterminants pour le séchage.

En saison humide, soit de mai à septembre, il est possible de sécher à l'air libre lorsque le ciel est dégagé, l'humidité relative s'abaissant à 55 % en milieu de journée (mois d'août). Le séchage solaire est néanmoins intéressant, car une élévation de température de 10°C abaisse l'humidité relative de 55 à 30 % et double le potentiel de séchage, soit de 0,003 à 0,006 kg eau/kg air sec.

En saison sèche, soit d'octobre à avril, les conditions sont particulièrement favorables. En février, l'humidité relative en milieu de journée est de 10 % et le potentiel de séchage de 0,008 kg eau/kg air sec. Durant cette période, le séchage à l'air libre est

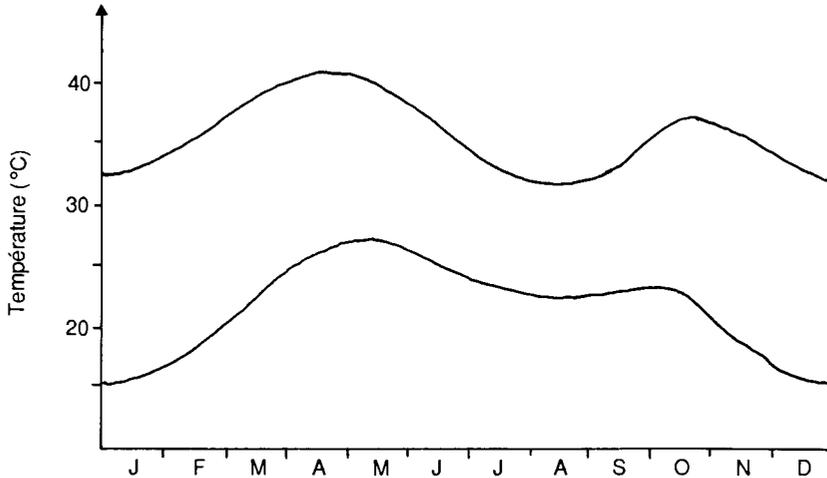


Fig. 1. Moyenne de température minimale et maximale mensuelle; aéroport de Niamey, 1951 à 1982. Source : Météorologie nationale.

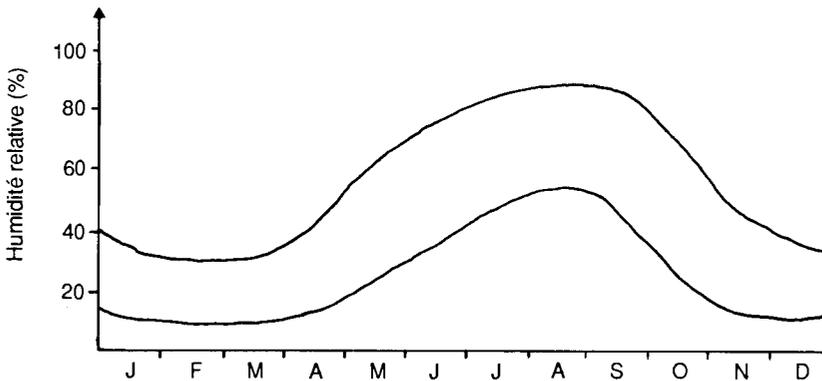


Fig. 2. Moyenne d'humidité relative minimale et maximale mensuelle; aéroport de Niamey, 1961 à 1985. Source : Météorologie nationale.

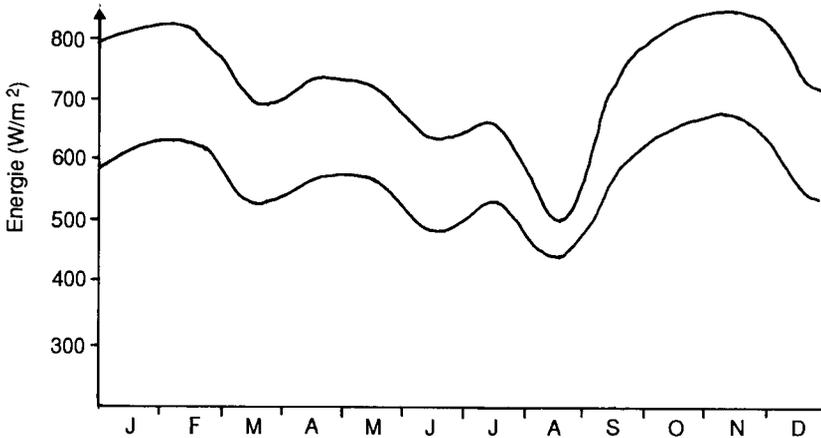


Fig. 3. Rayonnement global maximal et moyen (entre 8 h et 16 h TSV - Temps solaire vrai) reçu par une surface inclinée à 13,5° (latitude de Niamey). Source : ONERSOL, Niamey, 1985.

très efficace. L'intérêt du séchage solaire se limite à la protection des produits, un réchauffage de l'air étant toutefois nécessaire pour maintenir une bonne ventilation naturelle.

Objectifs du séchage solaire

Tant du point de vue des auteurs, de la documentation spécialisée que de l'expérience de l'ONERSOL, les objectifs à atteindre lors de la conception des séchoirs solaires n'ont pas été définis assez précisément. D'une façon générale tout le monde s'entend pour souhaiter obtenir un produit séché de qualité, un séchoir de faible coût et une production maximale dans un minimum de temps.

Nous avons voulu préciser notre cahier des charges : pour le produit, protection absolue contre les insectes et prédateurs; à la fin de la première journée de séchage, tous les produits doivent avoir atteint une teneur en eau d'au maximum 65 % ou d'une teneur en eau sur base sèche de 1,86 kg eau/kg matière sèche; et pour le séchoir, résistance aux intempéries; entretien aisé; coût minimum.

Il s'agit en effet de protéger les produits en premier lieu des dégradations et des pollutions engendrées par les insectes et les prédateurs. La durée totale du séchage n'est pas un critère qui influence la qualité du produit. Pour garantir la qualité du produit, il faut que sa teneur en eau s'abaisse jusqu'à 65 % à la fin de la première journée (17 h TSV - temps solaire vrai) de façon à empêcher le développement des moisissures et des bactéries pendant la première nuit (Fournier et al., 1983).

Pour la viande dont la teneur initiale est d'environ 85 %, ce critère est confirmé par une étude de l'Institut d'élevage et de la médecine vétérinaire du Tchad (IEMVT) sur la viande séchée qui préconise une perte de poids de 0,6, ce qui correspond à une teneur en

eau de 62 %. En dessous de cette teneur, la viande est en principe protégée au moins pour la nuit. Notons que ce critère se traduit par des quantités d'eau très variables à extraire le premier jour selon la teneur initiale en eau du produit. Par exemple, pour 10 kg de tomates fraîches d'une teneur initiale de 95 %, il faut extraire 8,6 kg d'eau pour atteindre une teneur en eau de 65 %. Alors que pour 10 kg de viande de teneur initiale de 85 %, il faut extraire 5,7 kg d'eau. La deuxième journée de séchage abaisse encore la teneur en eau pour garantir une bonne conservation du produit.

Les prototypes réalisés par l'ONERSOL depuis 1980

Les premières expériences de séchage solaire remontent à 1980 quand l'ONERSOL a signé un projet de recherche financé par le CRDI sur le séchage des oignons. À l'époque, on pensait que l'oignon séché aurait des débouchés au Niger, ce qui a été réfuté par les observations de l'un des auteurs à la suite d'une mission à l'intérieur du pays en juillet 1985.

Depuis 1980, cinq prototypes ont été réalisés :

1981	Séchoir type tour	- Séchoir A
1983	Séchoir aluminium	- Séchoir B
1984	Séchoir en briques	- Séchoir C
1985	Séchoir en bois	- Séchoir D
1986	Séchoir SAHEL 50	- Séchoir SAHEL 50

Les difficultés d'organisation à l'ONERSOL n'ont pas permis de mener à bien toutes les expériences. Néanmoins, chaque prototype a permis de se confronter aux problèmes pratiques d'utilisation et d'entretien.

Les séchoirs prototypes

Séchoir A - Les résultats des expériences de séchage d'oignons dans le séchoir A (fig. 4) ont mené au rejet définitif de la géométrie de la colonne à plateaux. Les trois claies chargées l'une au-dessus de l'autre créaient une perte de charge telle que la ventilation naturelle devenait insuffisante. Les oignons se trouvaient dans une ambiance saturée en eau et chaude (55°C) et donc pourrissaient.

Séchoir B - Ce séchoir en aluminium (fig. 5) a permis de tester un cabinet de séchage où l'air circule parallèlement aux deux claies, et où la claie supérieure est soumise au rayonnement solaire à travers une vitre. Grâce à la cheminée d'une hauteur de 3 m, le débit d'air a été suffisant pour éviter une surchauffe au niveau des oignons. D'un coût très élevé (275 000 F CFA) et d'une capacité faible, seulement 6 kg d'oignons, ce prototype n'a pas été vulgarisable, mais a permis d'adopter la géométrie du cabinet de séchage mixte.

Séchoir C - Construit en briques de terre cuite (fig. 6), ce séchoir est de conception robuste. Les produits sont disposés sur des claies reposant sur un tiroir en aluminium, accessible par l'arrière. La mise en oeuvre du système de glissières (aluminium, cornières, poutres, grillages) a entraîné un coût important. Les surfaces vitrées ne sont pas démontables, ce qui a rendu l'entretien difficile. Son rendement est résumé plus loin.

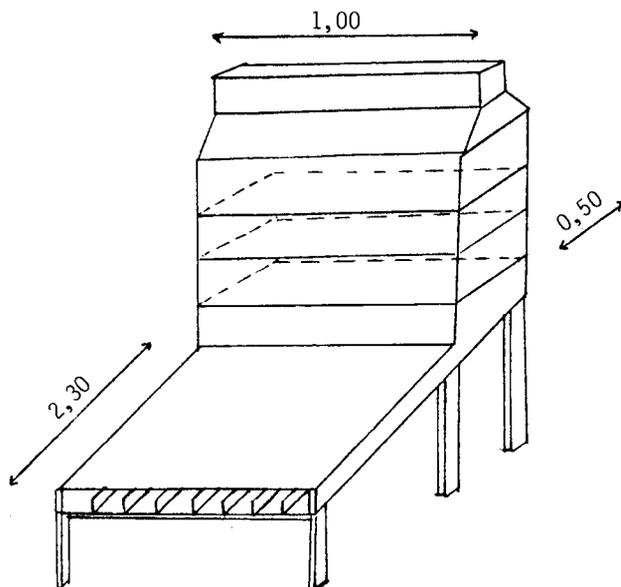


Fig. 4. Séchoir A, 1981.

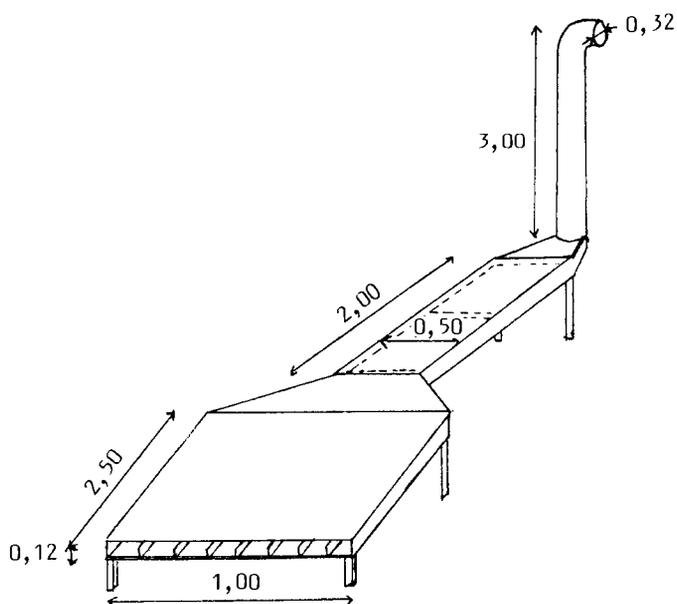


Fig. 5. Séchoir B, 1983.

Séchoir D - Tout en continuant à concevoir des séchoirs en ciment, nous avons construit un petit séchoir portatif (fig. 7) en

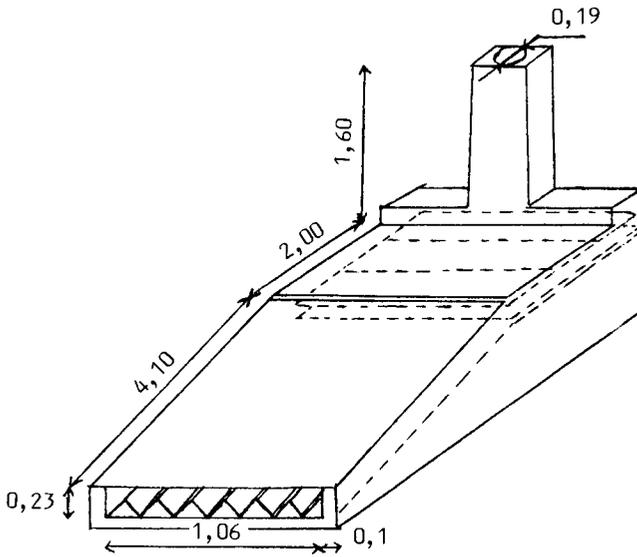


Fig. 6. Séchoir C, 1984.

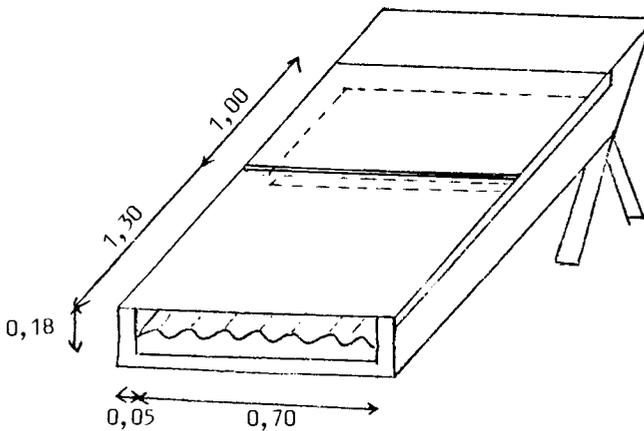


Fig. 7. Séchoir D, 1985.

bois, de capacité familiale, soit 6 kg de tomates, essentiellement afin d'arriver à un coût de revient minimum. Il s'agit d'un caisson de contre-plaqué isolé par 4 cm de copeaux de bois et recouvert de film EVA. L'absorbant est une tôle d'acier galvanisé peinte en noir, les claies en tiges de mil. Son coût de revient est de 38 000 F CFA dont 20 000 F CFA de bois et 2 300 F CFA de film plastique (Niamey, septembre 1985). Étant donné le prix élevé du contre-plaqué et l'absence de bois de remplacement en zone sahélienne, le coût du

séchoir ne peut être diminué, ce qui fait qu'il n'est pas à la portée des agriculteurs nigériens. Il a par ailleurs séché avec succès 6 kg de tomates en 2 jours. Les tomates étaient installées à 10 h 45 TSV. À 14 h 30 TSV, la teneur en eau atteignait 65 %. Performances à 11 h 30 TSV : extérieur : température ambiante, 37°C; humidité relative ambiante, 14 %; rayonnement global incliné, 890 W/m². Intérieur : température à la sortie du réchauffeur, 58°C; vitesse moyenne à la sortie du réchauffeur, 0,09 m/s; débit d'eau extrait : 0,75 kg eau/heure.

La couverture en film EVA (marque de commerce) s'est bien comportée jusqu'à 60°C, ensuite elle s'est distendue de façon exagérée. Il n'est donc pas conseillé d'obturer la section d'entrée pour augmenter la température au deuxième jour de séchage dans ce modèle de séchoir.

Expérimentation des cheminées

Lors de campagnes successives de séchage d'oignons en 1985, nous avons mesuré des vitesses d'air au niveau des claies toujours inférieures à 0,1 m/s, ce qui est faible à la vue des valeurs obtenues dans d'autres séchoirs (Fournier et al., 1983). Nous avons cherché à augmenter cette vitesse en modifiant la cheminée. Pour cela, nous avons expérimenté simultanément quatre cheminées différentes sur quatre modules de séchoir de type C, par ailleurs identiques (fig. 8.). Trois cheminées ont la même section et des hauteurs différentes, la quatrième a une section plus large. Les quatre modules ont été chargés de la même quantité d'oignons, soit 8 kg.

Conditions de séchage (moyenne entre 10 h 00 et 17 h 00 TSV) : température ambiante moyenne, 38°C; humidité relative moyenne, 47 %; rayonnement global incliné, 600 W/m².

Résultats - Les figures 9 et 10 nous montrent l'évolution de la température à la sortie du réchauffeur et de la vitesse moyenne de l'air au cours de la première journée de séchage. On voit que la hauteur de la cheminée influe peu sur les paramètres de fonctionnement comparativement à la section de la cheminée. Il ressort de ces observations que la réduction de section au niveau de l'entrée de la cheminée crée une perte de charge telle qu'une augmentation de la hauteur de 1,61 à 2,43 m ne suffit pas à pallier à ce défaut. La cheminée large (section de 0,15 m² au lieu de 0,028 m²) a permis de doubler la vitesse (de 0,1 à 0,2 m/s¹), ce qui a eu pour conséquence d'abaisser la température, qui reste par ailleurs acceptable.

Conception et expérimentation du séchoir SAHEL 50

Les expériences sur les divers prototypes construits dans le passé à l'ONERSOL ont conduit à choisir un séchoir à convection naturelle de sorte que le courant d'air soit parallèle aux claies pour limiter les pertes de charge. Les produits peuvent alors être soumis au rayonnement solaire, ce qui est fortement recommandé pour la viande (IEMVT).

Nous sommes partis des observations faites sur le séchoir C pour concevoir un séchoir du même type dont les objectifs étaient un rapport de la surface des claies à la surface de captation au moins

	Cheminée				Symbole
	1	2	3	4	
Hauteur de la cheminée (m)	1,61	2,05	2,43	2,13	H
Section de la cheminée (m ²)	0,028	0,028	0,028	0,150	S
Section de passage au niveau des oignons (m ²)	0,420 ± 0,050				S ₂
Surface vitrée et inclinée (m ²)	3,675				Ω
Surface vitrée horizontale (m ²)	1,666				Ω'
Surface des claies (m ²)	3,456				S _c
Section d'entrée (m ²)	0,125				S _e

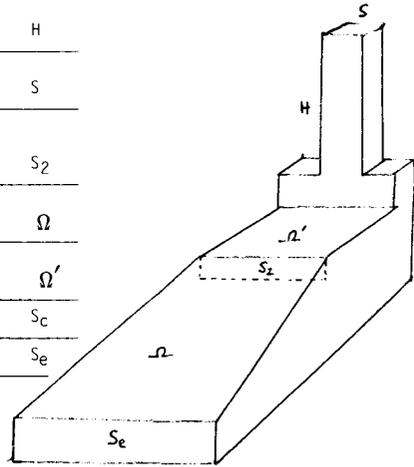


Fig. 8. Caractéristiques géométriques des cheminées.
Séchoir ONERSOL de type C.

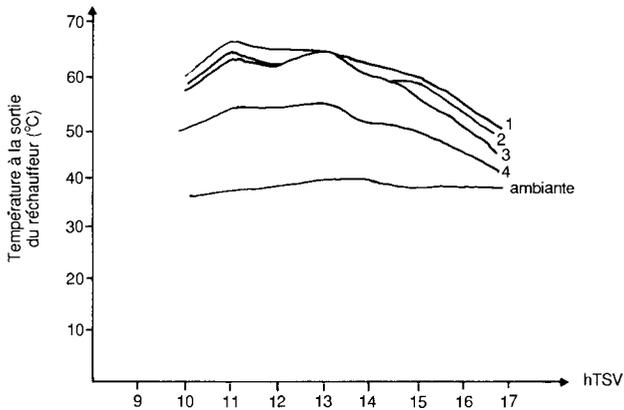


Fig. 9. Température à la sortie du réchauffeur.
(Les numéros de courbes renvoient à la figure 8.)

deux fois plus élevé que celui du séchoir C; un plus grand débit d'air par mètre carré de surface de captation et un entretien plus aisé.

En effet, lorsque les conditions météorologiques étaient favorables, le réchauffeur d'air du séchoir C s'est avéré trop grand par rapport à la surface des claies.

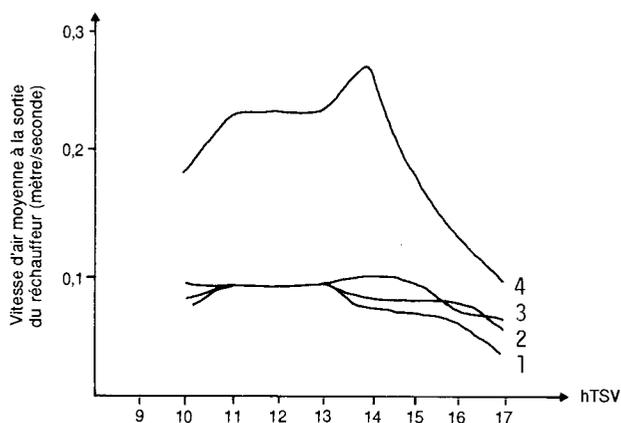


Fig. 10. Vitesse moyenne à la sortie du réchauffeur (m/s).
(Les numéros de courbes renvoient à la figure 8.)

Dans le sècheur SAHEL 50 (fig. 11), lorsqu'on supprime des claies, on augmente du même coup la surface du réchauffeur d'air. On peut donc adapter la charge aux conditions météorologiques grâce aux trois combinaisons possibles présentées au tableau 1.

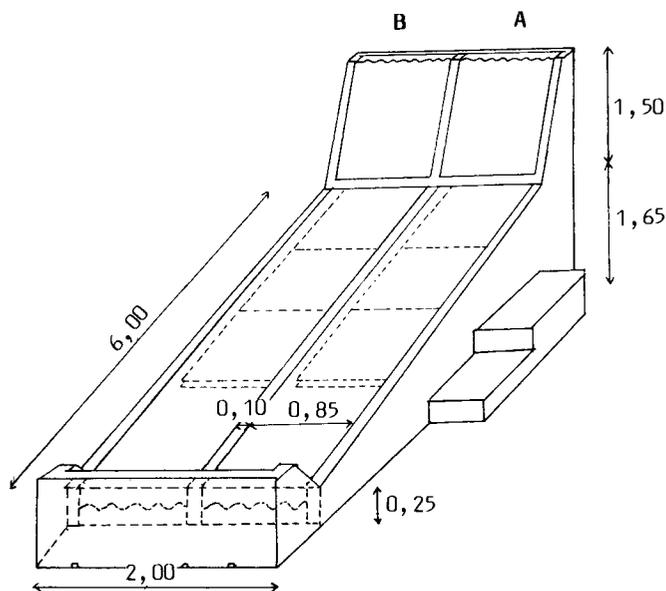


Fig. 11. Sècheur SAHEL 50, 1985.

Tableau 1. Rapport entre la surface du réchauffeur et des claies et la charge maximale.

Surface du réchauffeur (m ²)	Surface des claies (m ²)	Charge maximale de kilichi (kg)
3,4	13,6	50
5,7	9,0	33
7,9	4,5	16

Les surfaces transparentes sont accessibles par les côtés pour faciliter leur nettoyage. Le séchoir est constitué de deux modules identiques juxtaposés.

Il n'y a pas de réduction de section de la cheminée. La face sud de la cheminée est inclinée de 10 degrés par rapport à la verticale. Ainsi, à Niamey, latitude 13,5 degrés, au solstice d'été, la cheminée ne porte pas d'ombre sur le séchoir. Elle est en tôle d'acier noircie pour jouer le rôle d'absorbeur de cheminée chauffante. L'efficacité de ce dispositif n'a pas encore été testée. Le cabinet de séchage est incliné comme le réchauffeur, la pente est insuffisante pour que les produits glissent sur les claies. À 1 m de la section d'entrée, nous avons construit un muret d'une hauteur de 0,6 m qui limite la pénétration des poussières lors des vents violents.

La couverture transparente est en polycarbonate alvéolaire de 4,5 mm d'épaisseur. Le comportement en température élevée est le critère de choix, parce que les températures peuvent atteindre 70 à 90°C dans le séchoir lorsqu'on réduit la section d'entrée lors du deuxième jour de séchage du kilichi. Ce matériau nous a semblé adapté car il réunit les qualités suivantes : tenue jusqu'à 110°C, bon effet de serre, rigidité et résistance aux chocs.

Nous avons dû peindre en blanc brillant les plaques de polycarbonate au niveau des appuis. En effet, l'effet de serre local échauffait fortement la plaque et entraînait sa déformation. Après un nettoyage à l'air comprimé des alvéoles, les extrémités ont été obturées avec du ruban adhésif de façon à pouvoir les vider en cas de pénétration de vapeur d'eau à long terme. Le nettoyage se fait en douceur pour ne pas rayer le plastique. L'absorbeur est constitué de tôles en acier galvanisé peintes en noir mat. Les tiges de mil ont remplacé le grillage pour la confection des claies par souci d'économie (200 F CFA/m²).

Essais à vide

Les essais que nous avons effectués sur le séchoir SAHEL 50 sans produit étaient destinés à comparer deux options d'absorbeurs et à tester l'influence d'une moustiquaire à l'entrée.

Le rendement (débit d'air et élévation de température) d'un séchoir en charge et à vide ne sont pas comparables. Néanmoins, des essais à vide simultanément sur les deux modules peuvent permettre de choisir entre deux options possibles.

Nous avons choisi des absorbeurs en tôle d'acier galvanisé peintes en noir mat. Les tôles présentent une faible inertie thermique, sont facilement nettoyables et sont d'un coût abordable (1 900 F CFA/m²). En convection naturelle, le profil des absorbeurs n'a pas beaucoup d'influence sur le rendement des capteurs (Fournier et al., 1983). Par contre, le mode de circulation de l'air, simple ou double flux, peut être important. Nous avons testé deux solutions de configuration d'absorbeur, les sections d'écoulement étaient de 0,12 m. Dans le module B, l'air circule sous l'absorbeur seulement, une lame d'air est emprisonnée entre l'absorbeur et le plastique.

Le 25 mars 1986, dès 9 h TSV, nous observions que le module B avait un rendement supérieur : débit de 240 m³/h au lieu de 200 m³/h et élévation de température de 7°C au lieu de 6°C.

À 11 h TSV, la plaque de polycarbonate du module B se déformait. La lame d'air avait atteint une température de stagnation trop importante, ce qui mit fin à l'expérience. Nous en avons conclu qu'il n'est pas possible d'utiliser la configuration du simple flux sous peine de surchauffe dommageable au polycarbonate.

La protection la plus efficace contre les insectes consiste à placer à l'entrée du séchoir une moustiquaire métallique. Nous avons testé simultanément un module A avec moustiquaire et un module B sans moustiquaire (fig. 11) afin de vérifier si la moustiquaire ne créait pas une perte de charge trop importante. Le 26 mars 1986, de 11 h à 15 h TSV, nous avons observé que cette perte de charge engendre une chute de débit de 275 à 240 m³/h et une augmentation de température de 49 à 50°C. Malgré tout, la baisse de rendement est faible, nous avons choisi d'installer définitivement des moustiquaires métalliques.

L'idée était de stocker dans des cailloux une partie de la chaleur le jour pour la restituer la nuit, créant ainsi une faible circulation d'air et empêchant les produits de se trouver dans un milieu saturé. Nous avons placé dans le module A environ 1 m³ de roche de latérite ferrugineuse sous les premières claies après le réchauffeur.

Sous les claies du module B, nous avons placé deux tôles séparées par une lame d'air. Après plusieurs jours, la température au milieu des cailloux s'est stabilisée à 37°C. La nuit, la température extérieure était de 30°C, la température dans le séchoir était de 31°C et le débit d'air non mesurable. La cinétique de déstockage était trop lente pour être efficace, les écarts de température étaient trop faibles car les transferts thermiques par conduction ne sont pas assez bons. Il faudrait que le courant d'air de la journée lèche l'ensemble des cailloux, mais alors la perte de charge serait trop importante. En fonctionnement normal, ce système de stockage n'est pas valable. Pour augmenter la température des cailloux stockés, il faut obstruer presque totalement la section d'entrée pendant plusieurs jours avant le séchage, ce qui n'est pas toujours possible.

Pilotage par la section d'entrée de l'air

Le seul moyen d'agir sur le couple température-vitesse d'air d'un séchoir à convection naturelle est de créer une perte de charge supplémentaire dans le système. Le plus simple est de faire varier la section de passage de l'air à l'entrée du réchauffeur. Lorsqu'on ferme en partie l'entrée du réchauffeur, on observe simultanément une baisse du débit d'air et une augmentation de la température à la sortie du réchauffeur. Dans le cas où, en saison des pluies, l'humidité relative à la sortie du réchauffeur serait élevée, 75 %, on pourrait abaisser celle-ci en fermant partiellement la section d'entrée du réchauffeur.

Dans le cas où l'humidité relative à la sortie du réchauffeur est faible, entre 5 et 30 %, deux possibilités s'offrent selon que l'on se trouve dans la première ou seconde phase du séchage. Durant la première phase, on évacue l'eau libre du produit et la vitesse de l'air, ou le débit, est un paramètre très influent sur le séchage (Fournier et al., 1983). Le pouvoir séchant du débit d'air est à la fois fonction de la vitesse de l'air et de la température. Le problème est de savoir si une réduction de la section d'entrée peut augmenter le pouvoir séchant de l'air, indépendamment du fait que la vitesse de l'air influe sur la cinétique du séchage. Nous avons caractérisé le pouvoir séchant par D , le débit évaporable. D est le débit d'eau évacué, que le séchage soit adiabatique, ou isenthalpique, et que l'humidité relative à la sortie soit de 65 %.

$$D = \dot{m}_{as} (x_2 - x_0) \\ = (V_m)(S)(x_2 - x_0)/v_1 \quad [1]$$

x_2 et x_0 étant respectivement l'humidité absolue à la sortie et à l'entrée.

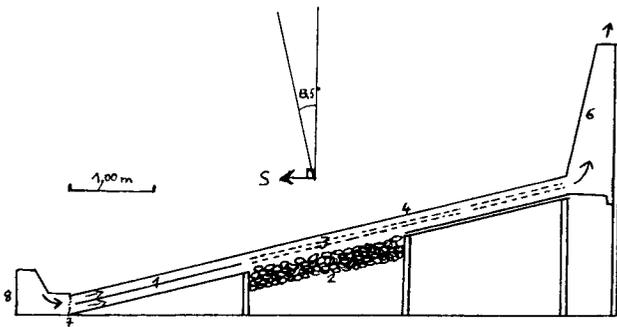


Fig. 12. Séchoir SAHEL 50, ONERSOL.

(1. absorbeurs; 2. lit de cailloux; 3. claies; 4. couverture en polycarbonate; 5. orifice d'évacuation de l'eau pluviale; 6. cheminée chauffante; 7. moustiquaire; 8. pare-vent de sable.)

\dot{m}_{as} est le débit d'air sec.

V_m la vitesse moyenne à la sortie du réchauffeur.

V_1 le volume d'air humide contenant la masse unité d'air sec à la sortie du réchauffeur.

S la section de passage à la sortie du réchauffeur.

Nous avons abordé le problème en nous plaçant dans un cas réel où l'air à l'entrée est à 30°C et son humidité relative est de 20 % (mois de février). Nous avons tracé les courbes d'iso-débit évaporable en fonction de la vitesse et de la température à la sortie du réchauffeur. Pour D donné, on cherche la relation entre la vitesse et la température, les paramètres x_2 et V_1 étant à chaque fois déterminés à l'aide d'un diagramme de l'air humide. Dans le même plan, nous avons représenté la variation de la température en fonction de la vitesse lorsqu'on ferme plus ou moins la section d'entrée (fig. 13).

En M_0 , la section est grande ouverte, en M_1 , elle est fermée à 60 % et en M_2 , elle est fermée à 90 %. Cette courbe a été tracée à l'aide de mesures expérimentales sur le séchoir SAHEL 50. On observe à la lecture du graphique que la réduction de la section d'entrée influe beaucoup plus sur la vitesse de l'air que sur la température, et donc diminue le pouvoir séchant. Nous en concluons que dans ce cas concret, durant la première phase de séchage, on a intérêt à limiter les pertes de charges au maximum.

Durant la deuxième phase du séchage, on évacue l'eau liée. Le débit à évacuer est beaucoup plus faible que durant la première phase. De plus, la vitesse de l'air n'a pratiquement plus d'influence sur la cinétique, du moment qu'elle est suffisante pour évacuer l'eau, car le front de transfert a alors migré à l'intérieur du produit. Par contre, la température a une très grande influence. Une augmentation

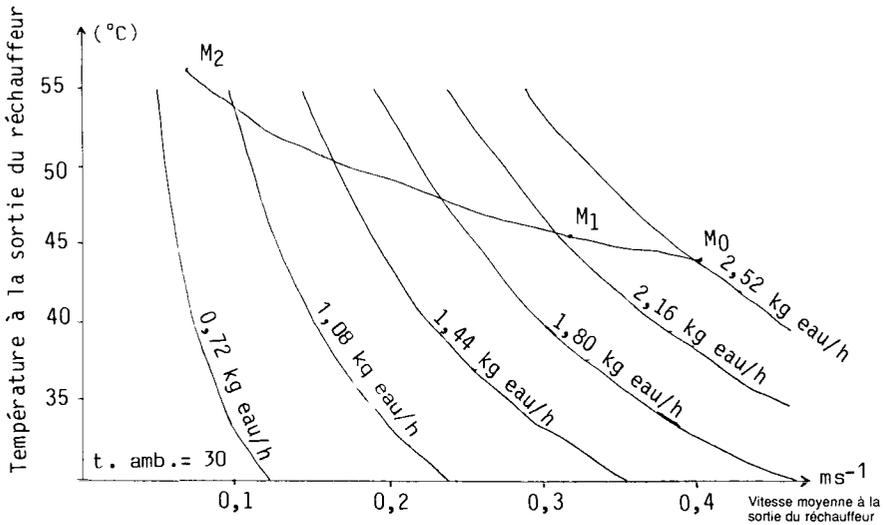


Fig. 13. Séchoir SAHEL 50. Courbe de fonctionnement suivant la section d'entrée, comparée aux courbes d'iso-débit évaporable. (Air extérieur : 30°C, 20 % d'humidité relative; rayonnement : 900 Wm⁻²; section sortie du réchauffeur : 0,37 m².)

de température diminue la pression partielle de l'eau dans l'air et augmente la pression de saturation à l'interface. C'est pourquoi le deuxième jour du séchage de la viande, deuxième phase, nous fermons partiellement la section d'entrée en contrôlant le degré hygrométrique en sortie (teneur en eau 65 %) pour accélérer le processus de séchage et pour atteindre une teneur en eau de la viande plus faible.

Dans la pratique, nous avons observé qu'une réduction de 90 % de la section était valable dès le matin du deuxième jour. Au cours de la journée du 17 avril 1986, la section a été fermée à 90 %, la température à la sortie du réchauffeur est passée de 56°C à 66°C, l'augmentation de l'humidité à la sortie du séchoir n'a pas été perceptible, compte tenu du débit évacué déjà très faible.

En fin de journée, la viande a atteint une teneur en eau de 4,6 %. Le séchoir a joué le rôle d'une étuve.

Essais avec charge

Pour les essais avec charge du séchoir SAHEL 50, nous avons séché du kilichi, lamelles de viande séchées et assaisonnées, préparées traditionnellement au Niger. Ce produit est très prisé mais d'un coût élevé (6 000 F CFA/kg). La qualité bactériologique du kilichi n'est pas toujours bonne (voir l'annexe) du fait de la contamination par les insectes et d'un séchage trop lent qui permet aux moisissures de se développer. Certains kilichi sont connus pour donner des diarrhées. La préparation est du domaine des bouchers, car la coupe demande de l'expérience.

Le 16 avril 1986, nous avons tenté avec succès de sécher du kilichi dans le séchoir SAHEL 50. Le matin, 50 kg de viande fraîche ont été achetés aux abattoirs de Niamey. Il s'agit de viande de boeuf désossée. Les bouchers commencent par éliminer la graisse et les tendons pour ne garder que des lambeaux longiformes de muscles. Ensuite, chaque lambeau est "déroulé" suivant une technique particulière de découpage dans le sens des fibres. On obtient des lamelles de quelques décimètres carrés et d'environ 5 mm d'épaisseur.

Ces lamelles sont étendues sur des claies en tiges de mil et mises à sécher jusqu'au lendemain soir. Quelques heures plus tard, il faut retourner les lamelles pour éviter qu'elles ne collent aux tiges de mil. Les lamelles séchées sont ensuite trempées dans une sauce à base de tourteaux d'arachide et de piments, et dont la composition exacte est gardée secrète par les bouchers pour raisons commerciales. Les lamelles absorbent la sauce, se ramollissent et sont remises à sécher pendant deux jours.

Le kilichi se consomme tel quel, on ne le réhydrate jamais. Les 50 kg de viande ont donné 29 kg de lambeaux utilisables. Dix-huit kg de lamelles fraîches ont été disposées dans un module du séchoir SAHEL 50. Les pesées des claies à la sortie du cabinet de séchage nous ont permis de tracer les courbes des teneurs en eau sur base sèche en fonction du temps (fig. 14).

Après 5 heures, toute la viande avait une teneur inférieure à 1,86 kg eau/kg de matière sèche, soit moins de 65 % d'eau, ce qui est un succès. Le deuxième jour, la section d'entrée de l'air était obturée à 90 %, ce qui éleva la température jusqu'à 72°C et sécha la

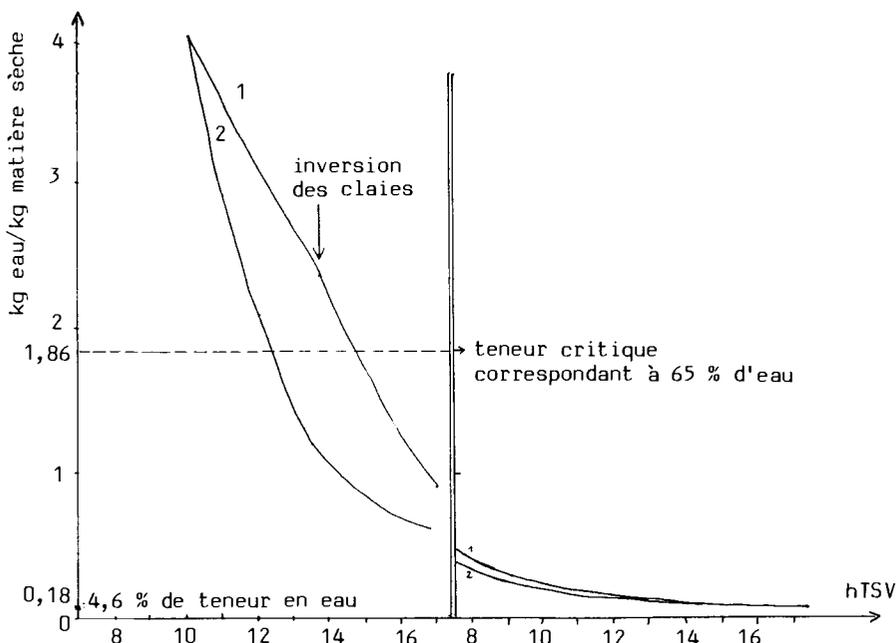


Fig. 14. Séchoir SAHEL 50. Séchage du kilichi les 16 et 17 avril 1986. (Charge initiale : 18 kg de viande fraîche par module; charge finale : 3,78 kg de viande séchée par module; 1. claie initialement dessous; 2. claie initialement dessus.)

viande jusqu'à une teneur en eau de 7 % en fin de journée. Ce deuxième jour, le débit d'air (30 m³/h au lieu de 180 m³/h quand la section est couverte) était suffisant. L'humidité relative à la sortie était inférieure à l'humidité à l'entrée du cabinet, compte tenu de l'élévation de température (fig. 15) due à la puissance solaire reçue par les claies supérieures. Le second séchage après assaisonnement n'a pas été étudié, les lamelles assaisonnées ont une teneur initiale en eau plus faible que la viande fraîche, 40 % au lieu de 80 % d'eau.

Conditions de séchage le premier jour - Nous donnons les valeurs horaires moyennes entre 10 h et 17 h TSV (fig. 15) : température ambiante moyenne, 43,5°C; humidité relative moyenne, 20 %; rayonnement global incliné maximal, 850 W/m; rayonnement global incliné moyen, 275 W/m; débit d'air, entre 70 et 180 m³/h pour un module; vitesse d'air au niveau de la viande, entre 0,2 et 0,4 m/s et température moyenne dans le cabinet de séchage, 52°C.

Rendement du séchoir

Pour juger le rendement du séchoir, on se place à la première heure de séchage, pendant que le débit d'eau à extraire est maximum. À l'aide des mesures de température et de vitesse de l'air, nous avons

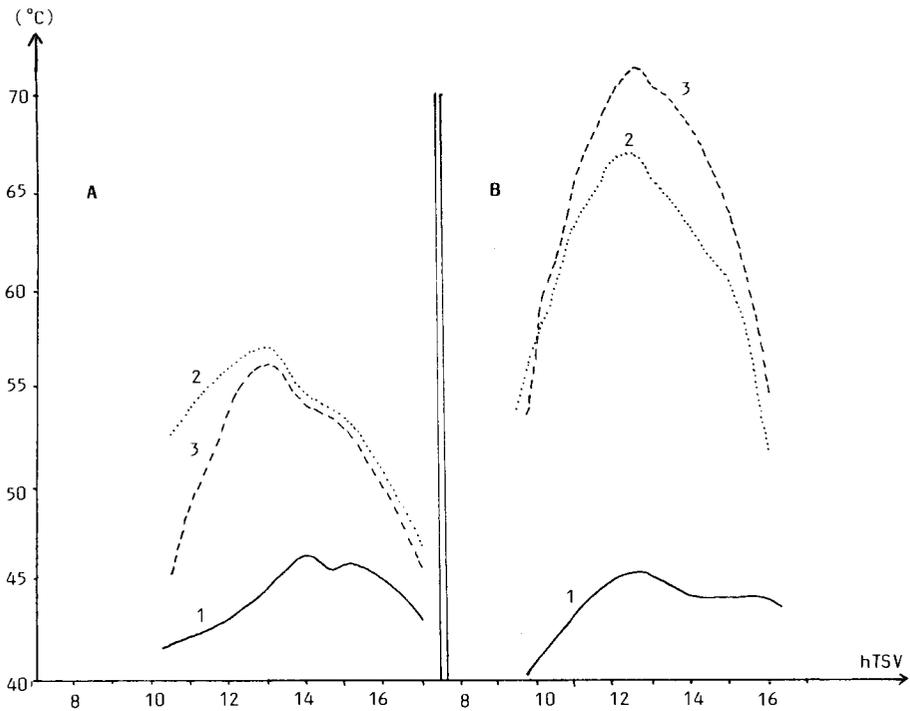


Fig. 15. Sêchoir SAHEL 50. Sêchage du kilichi les 16 et 17 avril 1986. 1. Tempêrature ambiante; 2. tempêrature à la sortie du rêchauffeur; 3. tempêrature à la sortie du cabinet de sêchage. Courbe A : section d'entrêe ouverte, débit maximal de 180 m³ par module. Courbe B : section d'entrêe fermêe à 90 %, débit maximal de 30 m³/h par module.

pu déterminer les paramètres d'état de l'air humide en trois points du sêchoir à 10 h 30 TSV (tableau 2).

Calcul du rendement de sêchage (η_s) - C'est le rapport de la puissance absorbêe par la vaporisation à la puissance solaire incidente.

$$\dot{m}_{AS} = \frac{V \times S}{\nu 2} = \frac{0,28 \times 0,185}{0,948} = 0,0546 \text{ kg AS/s} \quad [2]$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_{AS} (x_3 - x_2) = \dot{m}_{AS} (x_3 - x_1) = 0,0546(0,0257 - 0,0185) \quad [3]$$

$$\dot{m}_e = 4 \times 10^{-4} \text{ kg eau/s}$$

$$\eta_s = \frac{\dot{m}_e \times L_v}{G I \times S} = \frac{4 \times 10^{-4} \times 2258,3 \times 10^3}{752 \times 5,1} = 0,23 \quad [4]$$

Tableau 2. Paramètres d'état de l'air humide en trois points du séchoir : 1. Ambiance extérieure; 2. Sortie du réchauffeur et 3. Sortie du cabinet de séchage.

Paramètres	1	2	3
Température sèche θ (°C)	41,5	52,0	45,9
Température humide θ_h (°C)	28,0	--	32,5
Humidité absolue x (kg eau/kg d'air sec)	0,0185	0,0185	0,0257
Humidité relative (%)	37	22	45
Enthalpie massique H (Kcal/kg d'air sec)	21,8	23,9	27,0
Volume rapporté à l'air sec Ω (m ³ d'air humide/kg d'air sec)	--	0,948	--
Vitesse moyenne de l'air V (m/s)	--	0,28	--

où

S = Surface de captation

S^r = Surface de captation du réchauffeur (m²)

S'^r = Section du passage d'air (m²)

\dot{m}_{AS} = Débit d'air sec (kgAS/s)

m_e = Débit d'air sec (kg eau/s)

G_I = Rayonnement global incliné (W/m²)

L_v = Chaleur massique de vaporisation

V = Vitesse moyenne de l'air (m/s)

Cette valeur est tout à fait acceptable compte tenu du fait que nous nous trouvons au début du séchage, et comparativement aux valeurs de la documentation spécialisée (Fournier et al., 1983).

Calcul du rendement du capteur (η_c) - C'est le rapport de la puissance fournie par le réchauffeur à la puissance incidente.

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_{AS} (H_3 - H_2)}{G_I \times S} = \frac{0,0546(23,9 - 21,8) \times 4185}{752 \times 1,8} = 0,35 \quad [5]$$

où

H_2 = air à l'entrée du réchauffeur

H_3 = air à la sortie du réchauffeur

Cette valeur est correcte pour un capteur fonctionnant en convection naturelle.

Rendement adiabatique de l'enceinte de séchage (η_x) - On cherche sur le diagramme de l'air humide, l'humidité absolue de saturation pour que le séchage soit isenthalpique.

$$x_s = 0,0395 \text{ kg eau/kg AS}$$

$$\eta_x = \frac{(x_3 - x_2)}{(x_s - x_2)} = \frac{(0,0257 - 0,0185)}{(0,0395 - 0,0185)} = 0,34 \quad [6]$$

Compte tenu du fait que le séchage réel n'est pas adiabatique, cette valeur est faible, ce qui sous-entend que le séchoir peut être plus chargé. Ceci est confirmé par l'humidité relative en sortie qui

est de 45 % et du fait que la teneur des produits s'est abaissée à 65 % bien avant 17 h TSV, critère que nous nous sommes fixé au départ.

Cette expérience a prouvé que le séchoir SAHEL 50 peut sécher une quarantaine de kilogrammes de kilichi en deux jours dans les conditions de la saison chaude à Niamey.

Coûts du séchoir

Le coût du séchoir est élevé (tableau 3) compte tenu des matériaux utilisés qui sont tous importés de France ou du Nigéria (tableau 3). En particulier, le polycarbonate a été acheminé par avion, ce qui augmente son coût. Il représente 35 % du coût total. À ce chapitre, nous ne voyons pas quels matériaux de remplacement trouver. Ce qui veut dire que si l'on veut un séchoir en matériaux durables et à surfaces transparentes incassables, son coût sera inévitablement élevé (40 000 F CFA/m² de claie installé).

À ce prix-là, nous voyons au Niger un seul acheteur possible : la Société nigérienne d'exploitation des ressources animales (SONERAN) avec qui nous sommes d'ailleurs en discussion.

Conclusion

Compte tenu du contexte socio-économique et climatique du séchage au Niger, la seule application qui semble intéressante pour le séchage solaire demeure la viande.

Au fil des réalisations, l'ONERSOL a acquis une certaine expérience du séchage solaire en laboratoire, ce qui a abouti à la mise au point d'un séchoir fiable d'une capacité de 40 kg de viande fraîche. Son coût est élevé, 550 000 F CFA, mais il a été prouvé que le séchage solaire garantit une bonne qualité bactériologique de la viande séchée.

Maintenant l'ONERSOL devrait passer à une phase d'implantation expérimentale en milieu réel, à condition de trouver des partenaires intéressés par la commercialisation d'une viande séchée de qualité et de trouver des sources de financement.

Perspectives de recherche

Tous les séchoirs mis au point jusqu'à présent à l'ONERSOL sont construits avec des matériaux importés d'Europe ou du Nigéria, ce qui explique leur coût élevé. Aucun séchoir n'a été implanté et testé dans le monde rural. De ce fait, la recherche doit s'orienter désormais sur

- l'étude et l'utilisation des matériaux locaux dans la construction des séchoirs;
- la mise au point d'une méthodologie de diffusion des systèmes jugés fiables dans le monde rural et
- l'identification des besoins en séchage solaire.

Tableau 3. Coût du séchoir SAHEL 50. Niamey, mars 1986.

Quantité	Désignation ¹	Prix unitaire (F CFA)	Prix total (F CFA)
500	briques de ciment (0,2 x 0,1 x 0,4 m)	180	90 000
2	plaques de polycarbonate transparent (2,1 x 3 m)	96 000	192 000
20	sacs de ciment (50 kg)	2 900	58 000
12	tôles d'acier galvanisé (2 x 0,85 m)	3 100	37 200
2	chevrons (0,04 x 0,04 x 5 m)	5 500	11 000
1	fer à béton (6 mm)	800	800
1	fer à béton (8 mm)	1 600	1 600
1	voyage de sable	15 000	15 000
30	baguettes de bois (5 mm)	400	12 000
1	planche (30 mm)	6 500	6 500
2	peinture noir mat (0,7 litre)	2 300	4 600
1	peinture blanche (0,16 litre)	1 295	1 295
1	1 litre de solvant	1 770	1 770
1	rouleau de ruban adhésif	1 505	1 505
1	rouleau de ruban adhésif cache-peinture	1 220	1 220
2	Sandow - tendeur (5 m)	1 255	2 510
2	paires de crochets en acier	495	990
1	ficelle fine (50 m)	780	780
3	tuyaux en PVC (5 m)	106/m	1 590
1	moustiquaire métallique (0,6 x 1 m)	1 300	1 300
10	Sêcos (tige de mil tissé)	250	2 500
2	100 pointes d'acier (40 mm)	470	940
1	1 kg de pointes en vrac	1 000	1 000
	main-d'oeuvre pour la maçonnerie ²		107 570
Total			549 550

1. Liste établie d'après la construction du prototype.

2. L'ONERSOL a fourni pour la construction du prototype tous les outils nécessaires et mis à la disposition deux personnes à temps complet pendant une semaine.

Annexe

Qualité bactériologique du kilichi

Une expérience de séchage solaire du kilichi a été réalisée dans le séchoir de type C du 12 au 15 novembre 1985 dans le but de prouver que le séchoir solaire améliore la qualité du produit final. Deux lots de viande ont été préparés par un boucher dans les locaux de l'ONERSOL. Un lot a été séché dans le séchoir de type C et l'autre à l'air libre au soleil.

Préparation du kilichi

12/11/85	9 h 00 découpage de la viande 12 h 45 début du premier séchage
13/11/85	17 h 00 collecte des lamelles séchées
14/11/85	9 h 00 assaisonnement 11 h 00 début du deuxième séchage
15/11/85	17 h 00 collecte du kilichi

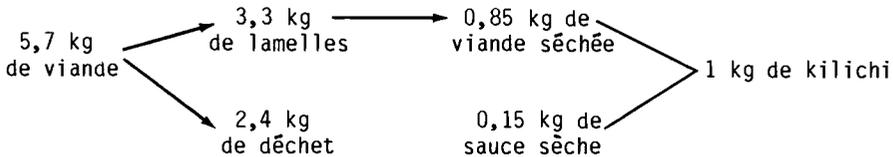
La préparation a été rigoureusement la même pour chacun des lots séchés dans le séchoir et à l'air libre, à la différence près que la nuit, la viande mise à sécher à l'air libre est enveloppée dans du papier et stockée dans des cartons.

Conditions de séchage le premier jour entre 12 h 45 et 17 h 00

Température ambiante moyenne : 32°C
 Humidité relative ambiante moyenne : 30 %
 Vitesse du vent extérieur : 1 à 2 m/s
 Température moyenne à la sortie du réchauffeur : 50°C
 Rayonnement global incliné moyen : 730 W/m²
 Vitesse moyenne de l'air au niveau de claies du séchoir : 0,05 m/s

Résultats - L'analyse bactériologique a montré que le kilichi solaire est d'une qualité supérieure au kilichi traditionnel qui renferme des coliformes et des streptocoques. Nous n'avons pas pu déterminer à quel moment ont eu lieu la contamination et la prolifération.

Coût de revient du kilichi



On voit que 1 kg de kilichi a une valeur nutritive équivalente à 3,3 kg de viande de première qualité à laquelle on ajoute environ 0,1 kg de pâte d'arachide. Le coût de revient pour 1 kg de kilichi se décompose de la manière suivante :

- Achat de viande (5,7 kg)	3 990 F CFA
- Travail de coupe et sauce	1 935 F CFA
- Emballage dans un sachet de 55 F CFA	polyéthylène

Total	5 980 F CFA/kg
-------	----------------

À une valeur nutritive égale, le kilichi coûte 1,5 fois plus cher que la viande fraîche, mais se conserve plusieurs mois.

Bibliographie

- Fournier A. et A. Themelin. 1983. Séchage solaire et développement rural. Colloque Bordeaux. 8 au 20 mai 1983. GRET-CERDAT-LEPT Expérimentation des modèles SERESOL et MS-003.
- IEMVT (Institut d'élevage et de médecine vétérinaire du Tchad). n.d. Étude bactériologique et mycologique des viandes séchées dans les conditions africaines. IEMVT, N'Djamena, Tchad.

L'ÉNERGIE SOLAIRE UTILISÉE POUR LE SÉCHAGE DES RÉCOLTES PAR DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

E.A. Arinze¹

Résumé — Ce document présente des données sur l'énergie solaire disponible (ainsi que sur l'emplacement tropical typique) et les applications de cette énergie dans la production agricole. On expose diverses méthodes visant à améliorer les pratiques traditionnelles de séchage à l'air libre des cultures et des produits dans les pays en développement par l'élaboration et l'introduction de procédés appropriés de séchage solaire. De façon plus particulière, on explique la construction et le rendement de certains séchoirs à énergie solaire contrôlée mis au point au Nigéria. On présente également des données expérimentales sur les caractéristiques d'absorption de l'énergie solaire par certains produits agricoles.

Introduction

Le pétrole répond à l'heure actuelle à la plupart des besoins énergétiques de l'agriculture et de l'industrie. Cependant, à mesure que les combustibles conventionnels à base de pétrole se raréfient et deviennent de plus en plus coûteux, il faut en restreindre l'utilisation dans les applications stationnaires à faible température, comme le contrôle de l'humidité et de la température ambiante, le séchage des récoltes, le chauffage de l'eau et l'irrigation. L'énergie solaire peut approvisionner tous ces secteurs. La technologie de l'énergie solaire ainsi que la recherche se développent rapidement et une bonne partie de la technique nécessaire aux applications industrielles et agricoles existe déjà.

La plupart des pays en développement s'intéressent de plus en plus au développement rural et ce phénomène entraînera sans aucun doute une augmentation phénoménale de l'énergie utilisée sous quelque forme que ce soit dans les régions rurales. On doit abandonner complètement les vieilles pratiques millénaires qui font appel à la main-d'oeuvre humaine et à la traction animale, aux déchets animaux et au bois de feu ou au charbon de bois comme principales sources d'énergie. L'expérience a montré que de telles méthodes étaient fort régressives sur le plan humain et environnemental. Il faudrait donc favoriser dans les pays en développement, surtout pour la production agricole, une utilisation accrue des sources d'énergie renouvelables comme l'énergie solaire sous toutes ses formes.

1. Département du génie agricole, Faculté de génie, Université Ahmadu Bello, Zaria, Nigéria.

La présente communication donne un aperçu général de l'énergie solaire disponible, en s'attachant à un pays tropical typique (Nigéria) et à d'autres paramètres climatiques pertinents au séchage des récoltes. On présente diverses méthodes visant à améliorer les techniques traditionnelles de séchage à l'air libre des récoltes dans les pays en développement, en mettant au point et en introduisant des techniques appropriées de séchage solaire. De façon particulière, nous décrivons la construction et le rendement de certains séchoirs solaires à convection naturelle ou forcée, fabriqués et mis à l'essai au Département de génie agricole de l'Université Ahmadu Bello de Zaria, au Nigéria. Enfin, on présente des données expérimentales utiles sur les caractéristiques d'absorption de l'énergie solaire de certains produits agricoles.

Energie solaire disponible et autres paramètres climatiques

À l'heure actuelle, l'intensité moyenne du rayonnement solaire normal (constante solaire) à l'extérieur de l'atmosphère terrestre s'élève à $1\,353\text{ W/m}^2$. En traversant l'atmosphère, une partie de ce rayonnement est dispersée, réfléchi et absorbée par les particules atmosphériques avant d'atteindre la surface de la terre. Le rayonnement global qui atteint la terre se compose à la fois de rayons directs (faisceau) et de rayons diffus.

Le rayonnement solaire qu'on peut capter à la surface de la terre a un caractère intermittent et saisonnier. De manière générale, l'inclinaison de la surface de captage vers le Sud (dans l'hémisphère nord) à l'angle de la latitude permettra de diminuer la variation saisonnière et permettra de capter annuellement le rayonnement maximum.

Plusieurs facteurs importants déterminent la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre :

- la composition de l'atmosphère;
- l'épaisseur de la couche atmosphérique (masse d'air) que les rayons doivent traverser avant d'atteindre la surface;
- l'heure du jour ou l'angle de l'heure solaire -- le captage maximum survient à midi, heure solaire;
- la latitude de l'endroit;
- l'inclinaison et la rotation de la terre qui déterminent la variation saisonnière et quotidienne de la quantité d'énergie solaire et
- l'angle d'inclinaison par rapport à la surface horizontale.

La figure 1 illustre la moyenne quotidienne du rayonnement solaire total horizontal (sur une base mensuelle) reçu chaque jour par deux endroits tropicaux typiques (Zaria et Kano, par 11° de latitude nord et 12° de latitude nord respectivement) dans la partie nord du Nigéria. À ces deux endroits, l'énergie solaire disponible ne présente que de légères variations d'une saison à l'autre.

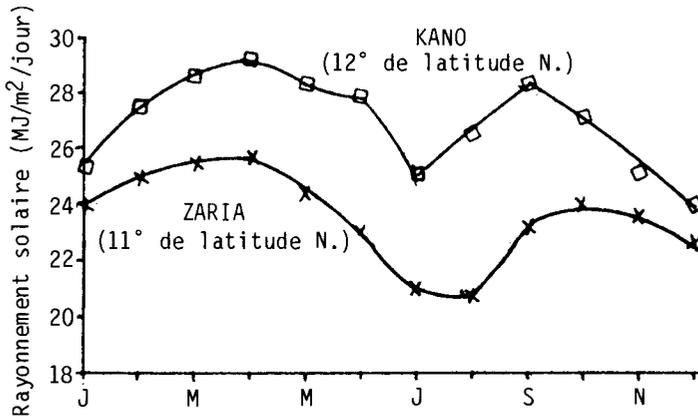


Fig. 1. Rayonnement solaire global (moyenne quotidienne) sur une surface horizontale à deux endroits tropicaux du Nigéria.

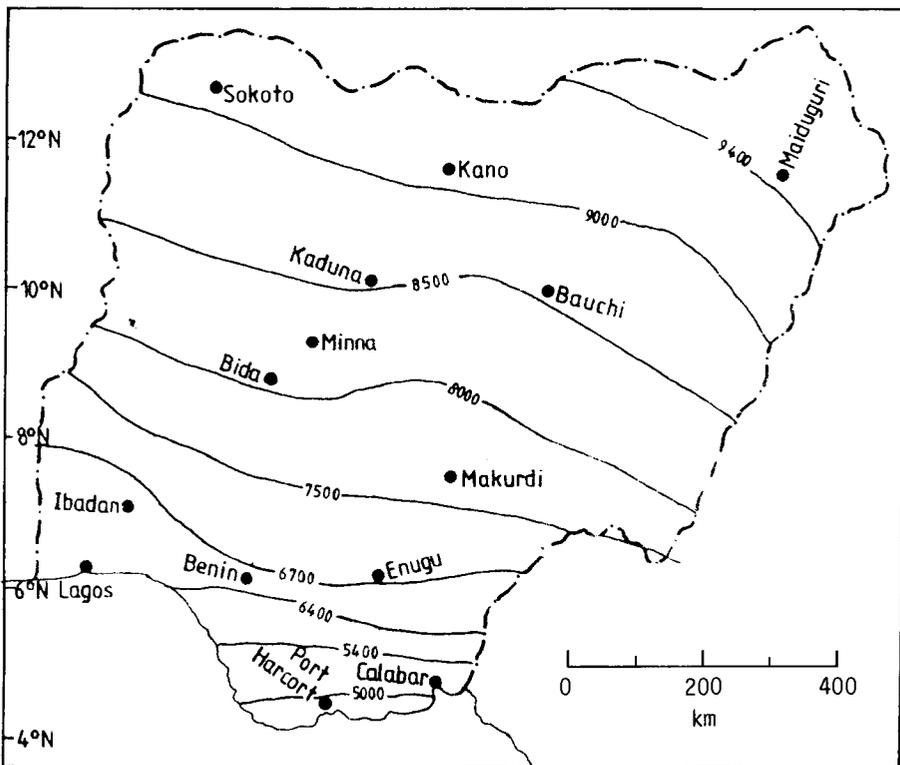


Fig. 2. Carte du rayonnement solaire annuel moyen au Nigéria (MJ/m^2).

Au Nigéria, le rayonnement solaire global disponible chaque année sur une surface horizontale est établi d'après la moyenne annuelle du nombre d'heures d'ensoleillement (Arinze et Obi, 1984b) et fluctue de 5 000 MJ/m², ou 45 % de la valeur maximum possible à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, dans le delta humide du Niger, à plus de 9 400 MJ/m², ou 70 %, dans l'extrémité de la partie nord-est du Nigéria (fig. 2). De manière générale, janvier à avril sont les mois qui reçoivent le plus d'énergie solaire et juillet à septembre, le moins : cette dernière période est également celle où il tombe le plus de pluie.

Le Nigéria est situé sous les tropiques et connaît des températures élevées toute l'année. La moyenne enregistrée à la plupart des stations du Nigéria atteint environ 27°C. Comme pour le rayonnement solaire, les variations de température en fonction des saisons et de la latitude influent sur les valeurs extrêmes ainsi que sur l'écart diurne et saisonnier de la température. Les températures de l'air les plus élevées surviennent habituellement en mars et en avril et les plus basses, en décembre et en janvier dans la partie nord, pendant la saison du harmattan, et en juillet et août dans le Sud, pendant la saison des pluies. Les températures maximums moyennes passent de 32,2°C sur la Côte dans le Sud à 40,6°C dans l'extrême nord (fig. 3). Par contraste, à cause des effets du climat continental,

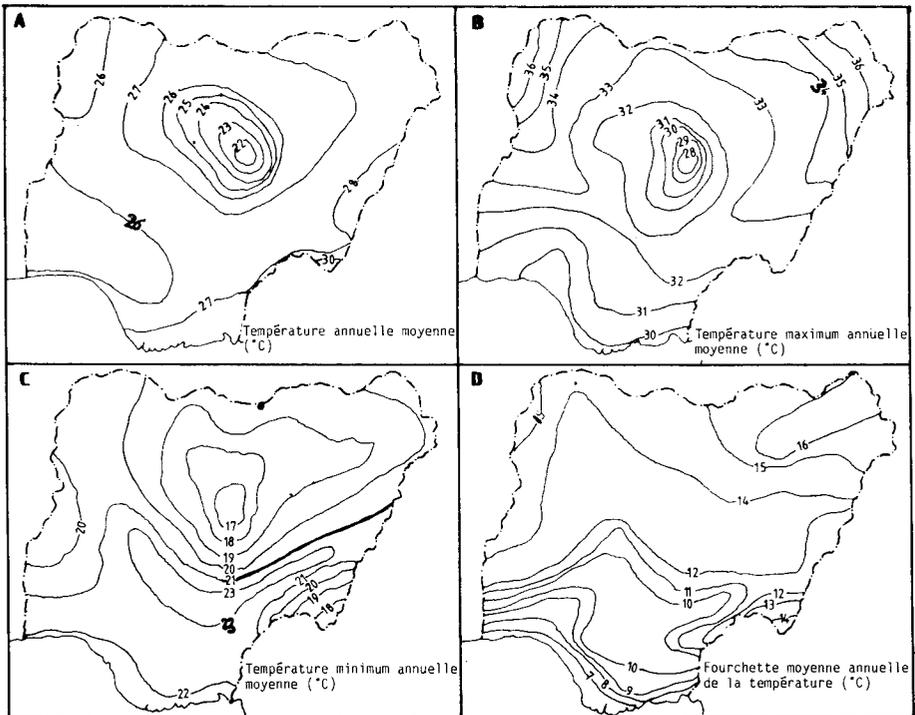


Fig. 3. Températures extérieures (°C) au Nigéria : moyenne annuelle (A), moyenne annuelle maximum (B), minimum (C) et écart (D).

les températures minimums moyennes décroissent vers le Nord, passant de 21,1°C sur la Côte, la plus faible moyenne annuelle, à moins de 12,8°C dans le Nord.

L'humidité relative (HR) fluctue considérablement selon les régions et d'une saison à l'autre. Dans les régions côtières du Sud, l'humidité relative affiche une moyenne mensuelle supérieure à 90 % entre juin et octobre mais dans le Nord, entre janvier et avril, les valeurs moyennes fluctuent de 30 % au crépuscule à 10 % dans l'après-midi. C'est la saison du harmattan où les alizés secs du Nord-Est soufflent à partir du Sahara des quantités impressionnantes de poussière sous un temps clair. Règle générale, les précipitations de pluie diminuent en durée et en quantité à mesure que l'on s'éloigne de la côte sud vers l'intérieur des terres. Les régions côtières reçoivent plus de 4 000 mm de pluie sur une période de 8 à 10 mois alors que dans l'extrême nord, il tombe moins de 250 mm sur une période de 3 à 4 mois.

Le climat du Nigéria est un microcosme du climat de l'Afrique occidentale. Les fluctuations climatiques du pays et du reste de l'Afrique occidentale ne sont pas des occurrences locales mais font plutôt partie des schémas climatiques mondiaux.

Techniques de séchage des récoltes

À cause de plusieurs facteurs, notamment l'utilisation de la terre (p. ex., les cultures intercalaires et les double ou triple cultures dans une même année), les pertes de récoltes, les hybrides hâtifs, le moment de la récolte par rapport aux conditions du sol (ainsi, l'arachide doit être récoltée lorsque le sol est suffisamment humide), il a été nécessaire de sécher mécaniquement la plupart des cultures après leur récolte. Les produits agricoles récoltés doivent être entreposés à sec (teneur en eau de 12 % à 14 % à l'état humide) pour éviter l'infestation par les micro-organismes et les champignons ainsi que le réchauffement interne des produits. À certaines étapes du conditionnement des aliments, il faut aussi recourir au séchage.

Bon nombre de pays développés et hautement industrialisés utilisent couramment les séchoirs artificiels à cause du coût élevé de la main-d'œuvre, de conditions climatiques défavorables, d'une production élevée et de normes de haute qualité. Ces séchoirs fonctionnent principalement à l'électricité, au gaz, au mazout ou aux combustibles solides. Ils nécessitent généralement une mise de fonds importante et ne sont donc pas appropriés pour les petits agriculteurs ou pour la plupart des industries agro-alimentaires d'Afrique ou des pays en développement. À cause de leur taille et de leur complexité, ces séchoirs ne peuvent répondre aux exigences de l'agriculteur qui doit sécher de petites quantités de produits pendant de courtes périodes tout au long de l'année.

Le séchage à l'énergie solaire est, en totalité ou en partie, une solution de rechange efficace par rapport au séchage artificiel, bien que la quantité de produits séchés soit beaucoup moins importante. On peut utiliser une main-d'œuvre moins spécialisée pour construire, exploiter et entretenir les séchoirs solaires à l'aide de matériaux peu coûteux et facilement disponibles en régions rurales.

Séchage à l'air libre

Dans plusieurs pays en développement, le séchage à l'air libre des cultures récoltées est la pratique courante, le soleil constituant la source d'énergie utilisée. Généralement, la technique consiste à étaler la récolte au soleil sur une surface appropriée (p. ex., des nattes ou un étal), à la suspendre à la toiture d'un bâtiment, à des arbres, etc., ou à la laisser sécher sur pied, en moyettes ou en bottes. Bien que le séchage à l'air libre ne demande qu'une mise de fonds ou des connaissances peu importantes, il comporte un grand nombre de limites et de problèmes. La perte d'humidité est habituellement intermittente et irrégulière et le taux de séchage, généralement faible, ce qui accroît le risque de pertes pendant le séchage. La teneur finale en eau du produit séché peut être élevée à cause des faibles températures de l'air ambiant et de l'humidité relative importante, et ainsi faire pourrir la récolte pendant son entreposage ultérieur. Il y a également d'autres problèmes liés au séchage à l'air libre : contamination par la poussière, infestation par les insectes et les rongeurs, pillage ou destruction par les oiseaux ou l'homme, étalement des cultures sur des surfaces ou des terres relativement grandes et enfin obligation de protéger la récolte en cas de pluie. Cependant, cette méthode est encore celle qui est de loin la plus utilisée pour le traitement des produits agricoles puisque plus de 80 % de la production récoltée au Nigéria est séchée à l'air libre.

Séchage solaire des récoltes

Le séchage solaire des récoltes repose également sur le soleil comme source d'énergie principale. Toutefois, il diffère du séchage à l'air libre par la structure simple, comme un capteur solaire plan, que l'on utilise pour accroître l'effet de l'insolation et pour réduire au minimum la perte de l'énergie solaire recueillie. Le séchage solaire représente une solution intéressante au séchage à l'air libre surtout pour les agriculteurs des pays en développement. Par comparaison au séchage à l'air libre, les séchoirs solaires peuvent produire des températures plus élevées et, partant, une humidité relative plus faible, deux facteurs qui contribuent à accroître le taux de séchage et à diminuer la teneur finale en eau du produit séché. Cet avantage diminue les risques de pertes pendant le séchage et l'entreposage. Les hautes températures du séchoir éloignent les insectes et réduisent les infestations microbiennes alors que la structure fermée protège contre la poussière, les insectes et les animaux.

On classe habituellement les séchoirs solaires selon que le produit est directement exposé aux rayons solaires, selon le type de circulation d'air dans le séchoir et selon la température de l'air circulé dans la chambre de séchage. Dans les séchoirs directs, la récolte est exposée au soleil mais dans les séchoirs indirects, on la place dans une enceinte de séchage fermée qui est protégée des rayons solaires.

La circulation de l'air dans le séchoir solaire peut être naturelle ou forcée (par un ventilateur). Étant donné les débits d'air plus élevés, l'efficacité du capteur solaire dans un séchoir à convection forcée est relativement plus importante que dans un séchoir à convection naturelle.

On utilise communément quatre types de séchoirs dans le séchage solaire des récoltes :

- des séchoirs directs à convection naturelle dans lesquels le capteur solaire et la chambre de séchage sont reliés l'un à l'autre;
- des séchoirs directs à convection naturelle où le capteur solaire et la chambre de séchage sont séparés;
- des séchoirs directs ou indirects à convection forcée dans lesquels le capteur solaire et la chambre de séchage sont séparés et
- des séchoirs hybrides directs ou indirects à convection forcée dans lesquels le capteur solaire et la chambre de séchage sont séparés l'un de l'autre mais où on utilise une autre forme d'énergie (électricité, gaz, mazout ou combustible solide) pour réchauffer l'air de séchage.

Exigences pour le séchage des récoltes au Nigéria

Le Nigéria pratique à la fois une agriculture pluviale et irriguée et près de 75 % de toutes les cultures poussent pendant la saison des pluies. L'irrigation se pratique surtout dans le Nord du Nigéria. Les principales céréales cultivées au pays sont le maïs, le millet, le sorgho, le niébé, le soya, l'arachide et le riz. Les tubercules comprennent l'igname, le manioc, la pomme de terre et la patate douce tandis que la tomate, l'oignon et le piment représentent les légumes communs. Comme les installations de conservation ne conviennent pas ou n'existent tout simplement pas, le prix de ces denrées peut fluctuer de plus de 500 % pendant une année. Ces cultures peuvent nécessiter pour la plupart une période de séchage après la récolte afin de pouvoir les conserver sur une courte ou longue période.

Dans la région du "middle-belt" et dans les parties méridionales du Nigéria, où l'humidité relative à l'extérieur est assez élevée pendant la saison de la récolte, le besoin d'installations de séchage des céréales devient beaucoup plus aigu. Il est extrêmement difficile de laisser les cultures sécher d'elles-mêmes sur pied. Le maïs est la principale céréale cultivée dans ces régions et sa récolte a lieu entre juillet et septembre, qui sont les mois les plus humides de l'année. Étant donné que le gouvernement a interdit l'importation de maïs, de riz et de blé pour 1987 et que l'on tente de remplacer la farine de blé par la farine de maïs dans la production de pain, on s'efforce actuellement d'accroître la production de maïs, d'où la nécessité de pouvoir utiliser une méthode de réchauffement de l'air humide pour permettre le séchage des grains. En l'absence d'une telle technique, les pertes de céréales augmenteront et on ne pourra atteindre le rendement net que promettait la production accrue de maïs.

Dans le Nord du Nigéria, l'ensemencement de la production de céréales pluviales débute normalement en juin. Plus de 95 % de cette production sèche naturellement sur pied avant la récolte finale qui se fait habituellement dans des conditions favorables (bon ensoleillement et humidité relative faible). Cependant, il peut se révéler

nécessaire d'apporter une source supplémentaire de chaleur pour le séchage des cultures récoltées hâtivement en août et en septembre, surtout sur le plateau Jos, où la fréquence et la quantité des précipitations ressemblent à ce que l'on trouve dans le Sud, ainsi que pendant les bonnes années où l'ensemencement peut commencer dès avril ou mai.

La tomate est le légume le plus important et le plus cultivé au Nigéria, surtout dans la région du Nord grâce à des régimes complémentaires d'irrigation. Pendant les récoltes en saisons sèche et humide, les tomates abondent et se vendent à vil prix, mais à cause du manque d'installations de conservation ou de leur mauvaise qualité, le prix de ce produit peut quintupler à la fin de la période de récolte. La tomate se conserve bien en la coupant en tranches avant de la sécher.

L'arachide est cultivée principalement dans le Nord du Nigéria et dans le "middle-belt" et sa récolte a lieu entre les mois d'août et de septembre. On doit sécher les cacahuètes avant de les écaler pour éviter leur infestation par les micro-organismes.

Les autres cultures pratiquées à la fois dans le Nord et dans le Sud du Nigéria qui peuvent être conservées par séchage comprennent l'igname et le manioc tranchés et le piment. Le riz représente l'une des principales denrées de nécessité au Nigéria et est de plus en plus cultivé à cause de l'interdit en vigueur sur les importations. Un séchage du riz s'impose à certaines étapes de son conditionnement.

Le séchage solaire peut s'appliquer à toutes ces récoltes.

Construction et rendement de séchoirs solaires de récoltes

Deux types de séchoirs solaires commerciaux à convection naturelle et forcée ont été mis au point, construits et éprouvés au Département de génie agricole, Institut de la recherche agricole de l'Université Ahmadu Bello.

Description et construction

Un séchoir solaire à convection naturelle et un séchoir solaire à convection forcée ont été construits à l'aide de matériaux facilement disponibles. Chacun des séchoirs se compose principalement d'un capteur solaire plan qui sert à réchauffer l'air de séchage, de bacs ou de chambres de séchage où sont entreposés les produits et enfin, de composants nécessaires à la circulation de l'air, comme des ventilateurs, conduites, collecteurs et cheminées. Le séchoir solaire à convection forcée mesure 1,2 m de largeur sur 15 m de longueur. Le capteur solaire est en contre-plaqué de 12,5 mm que l'on peut habituellement acheter en dimensions de 1,2 m sur 2,44 m. Pour obtenir un capteur de 15 m de longueur, on a abouté les feuilles de contre-plaqué à l'aide de planches de recouvrement. Le capteur a été recouvert d'une double pellicule de polyéthylène transparent de 4 mm d'épaisseur. Sur le dos et les parois du capteur, on a posé un isolant en mousse de fibre de verre de 25 mm et deux feuilles de panneaux de fibres Celotex de 12,5 mm, pour une couche d'isolation totale de 50 mm et une résistance thermique d'environ $1,4 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$. La surface absorbante se composait de tôles galvanisées de calibre 20

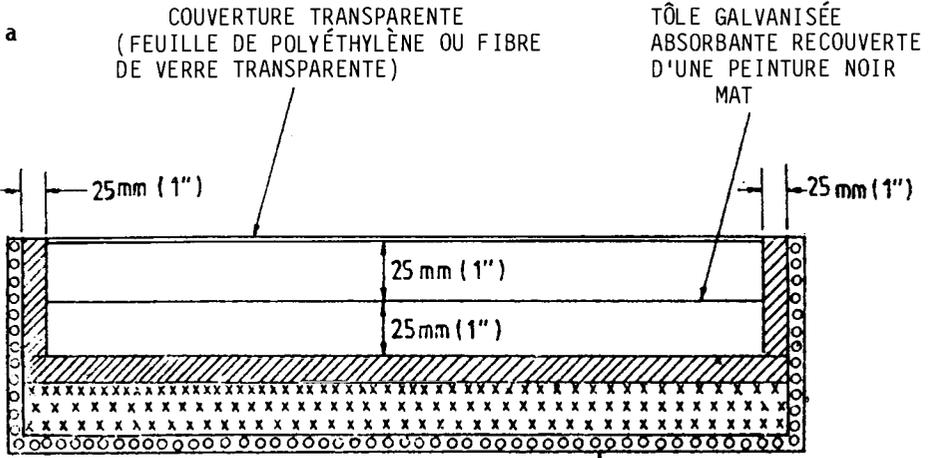
soudées ensemble et recouvertes d'une peinture noir mat. L'espace de 25 mm laissé entre la surface absorbante et le Celotex permettait la circulation de l'air (fig. 4a). Des prises d'entrée et de sortie d'air fabriquées en contre-plaqué ont été aménagées aux extrémités du capteur. À la sortie du capteur, l'air était acheminé par une conduite en métal isolée avec du polystyrène jusque dans une chambre cylindrique en métal (fig. 4b et 5).

La chambre de séchage cylindrique, construite en tôle galvanisée de calibre 18, avait un diamètre de 1,5 m et une hauteur de 1,8 m. Le chargement de la chambre se faisait par le haut, en montant dans une échelle. Pour faciliter le déchargement de la chambre, on avait aménagé sa base en forme de cône, à laquelle on avait accès par une porte métallique coulissante. Un système de distribution d'air à l'intérieur de la chambre assurait une circulation uniforme de l'air réchauffé. Un ventilateur centrifuge placé à l'entrée d'air du capteur solaire poussait l'air dans le capteur jusque dans la chambre de séchage. Afin de pouvoir comparer l'efficacité d'un séchoir à air chauffé (convection forcée) et non chauffé (convection naturelle), on a construit une deuxième chambre de séchage cylindrique semblable à la première, que l'on a raccordée à un ventilateur centrifuge du même type grâce à des conduites de métal.

Le séchoir solaire à convection naturelle était composé d'un capteur solaire pour réchauffer l'air ainsi que d'une chambre de séchage dotée d'une cheminée à son extrémité (fig. 6 et 7). Le cadre du capteur solaire et de la chambre de séchage était fabriqué de contre-plaqué de 19 mm alors que le fond et les parois étaient isolés avec des panneaux de fibres. On avait recouvert le capteur solaire et la chambre de séchage de panneaux transparents ondulés de fibre de verre, légèrement inclinés pour permettre l'écoulement de l'eau de pluie. Pour minimiser l'affaissement, les panneaux de fibre de verre étaient soutenus par des montants de bois cloués aux parois du capteur solaire et de la chambre de séchage.

On avait laissé un espace de 0,08 m entre le fond du capteur et la surface absorbante. Un déflecteur en bois avait été placé à l'entrée du capteur pour aider à répartir l'air sur toute la surface ainsi que dans la chambre de séchage. La récolte à sécher était étalée sur un treillis en métal perforé ou allongé, également surélevé de 0,08 m par rapport au fond de la chambre de séchage. Il y avait donc des espaces d'air en dessous et au-dessus de la surface absorbante et du treillis métallique de la chambre de séchage. Cette chambre se composait de quatre éléments démontables pouvant chacun recevoir 250 kg de produits étalés sur une épaisseur de 0,15 à 0,20 m. C'est là l'épaisseur maximale pour un séchage efficace puisque la circulation d'air dans la chambre de séchage, qui est engendrée par les forces thermiques, se limite à des taux assez faibles. On a pu obtenir un effet d'aspiration dans le système en posant à l'extrémité de la chambre de séchage une cheminée verticale cylindrique en tôle galvanisée de 3 m de longueur sur 0,3 m de diamètre.

Sur les deux côtés de chaque unité de la chambre de séchage se trouvait une fenêtre en bois à charnières pour faciliter le chargement et le déchargement du produit dans la chambre de séchage. Les fenêtres comportaient une serrure à gâche pour fermer hermétiquement la chambre pendant le séchage.



12,5 mm (1/2 po) Contre-plaqué épais



25 mm (1 po) Isolant épais en fibre de verre



12-5 mm (1/2 po) Panneau de fibres épais de Celotex

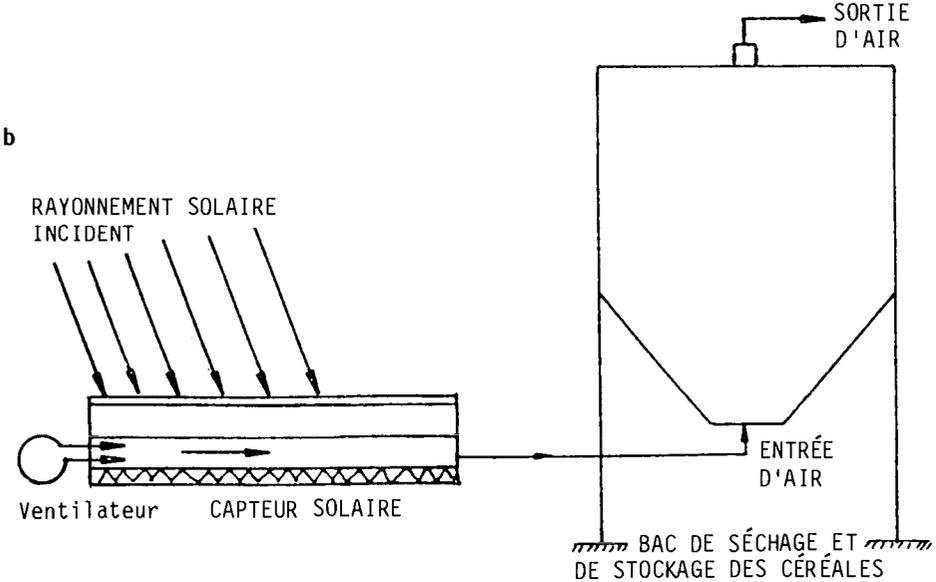


Fig. 4. Séchoir solaire de récoltes : vue latérale du capteur solaire plan ordinaire (a) et schéma du capteur solaire et du bac de séchage du séchoir à convection forcée.

Analyse théorique du rendement

Comme le présentent en détail Arinze et Obi (1984a) ainsi que Duffie et Beckman (1980), l'apport d'énergie utile du capteur s'écrit



Fig. 5. Séchoir solaire de récoltes à convection forcée.

comme suit :

$$\begin{aligned}
 Q_U &= M_a C_{pa} (T_o - T_i) \\
 &= A_c (\tau \alpha I_T - U_L (T_{pm} - T_i)) \\
 &= A_c \tau \alpha I_T - Q_L
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

où

- Q_U = apport d'énergie utile du capteur (W)
- M_a = débit massique du fluide de travail (kg/sec)
- C_{pa} = chaleur spécifique du fluide de travail (J/kg par °C)
- T_o = température du fluide à la sortie du capteur (°C)
- T_i = température du fluide à l'entrée du capteur (°C)
- A_c = superficie du capteur (m²)

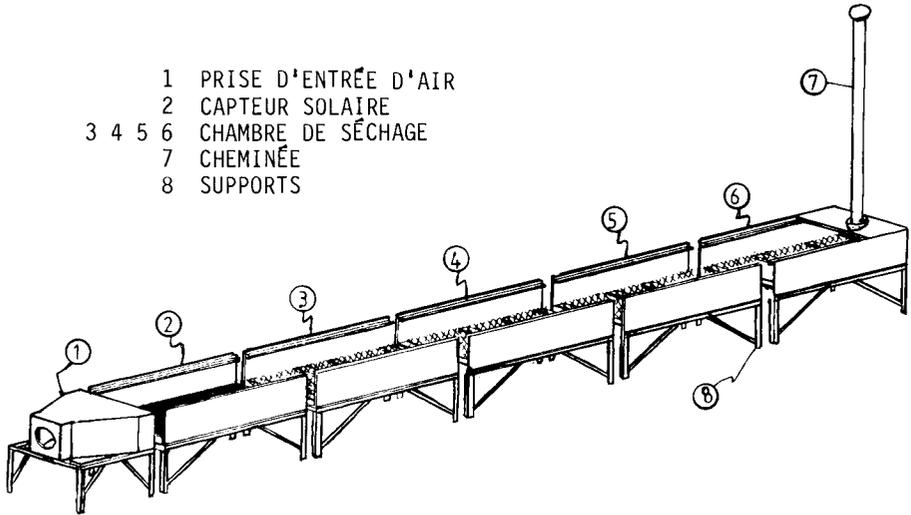


Fig. 6. Séchoir solaire de récoltes à convection naturelle.

- $\tau\alpha$ = transmittance réelle - produit absorbant de la couverture du capteur et de la surface d'absorption
 I_T = rayonnement solaire incident sur la couverture du capteur (W/m^2)
 U_L = coefficient des pertes thermiques globales du capteur (W/m^2 par $^{\circ}C$)
 T_{pm} = température moyenne de la surface absorbante du capteur ($^{\circ}C$)
 = $T_i + (T_o - T_i)/2$, approximativement
 Q_L = taux des pertes d'énergie du capteur vers le milieu ambiant (W)

Pour une période donnée, dt , l'efficacité du capteur (Duffie et Beckman, 1980) s'écrit comme suit :

$$\eta = \frac{\int Q_U dt}{\int A_C I_T dt} \quad [2]$$

En supposant que l'air à la sortie de la chambre de séchage soit à la température ambiante, T_i , la balance énergétique globale du système pour le capteur et le séchoir correspond à :

$$\begin{aligned} Q_U &= A_C \tau\alpha I_T - Q_L \\ &= Q_D + Q_S \\ &= M_a C_{pa} (T_{Di} - T_i) + M_a C_{pa} (T_o - T_{Di}) \end{aligned} \quad [3]$$

où

$$\begin{aligned} Q_D &= \text{taux d'énergie acheminé au séchoir à partir du capteur} \\ &\quad (W) \\ &= M_a C_{pa} (T_{Di} - T_i) \end{aligned}$$

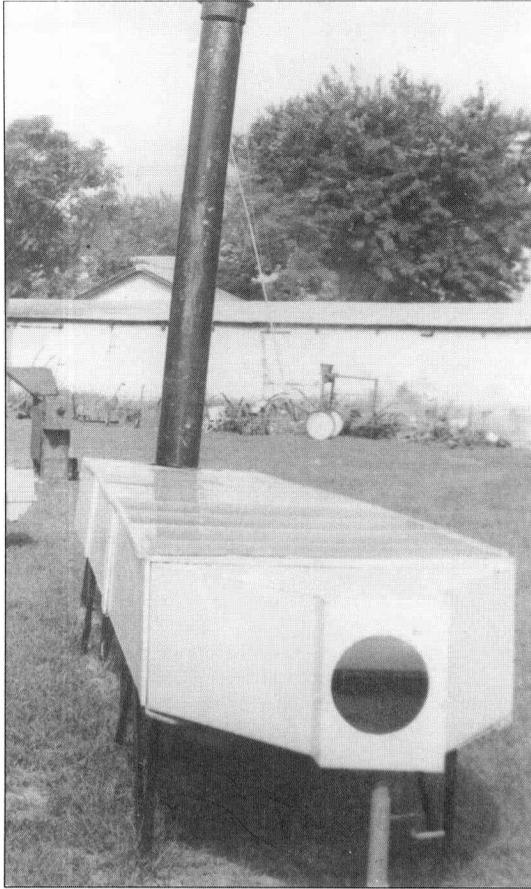


Fig. 7. Séchoir solaire de récolte à convection naturelle.

Q_S = taux de l'énergie perdue dans les conduites et les prises d'air à partir du capteur jusqu'à l'entrée d'air du séchoir (W)

$$= M_a C_{pa} (T_o - T_{Di})$$

T_{Di} = température de l'air à l'entrée du séchoir ($^{\circ}\text{C}$)

T_o = température de l'air à la sortie du séchoir ou température ambiante ($^{\circ}\text{C}$).

Arinze et Obi (1984a), Arinze (1985), Duffie et Beckman (1980) et ASHRAE (1977) donnent les méthodes permettant d'évaluer tous les membres des équations 1 à 3, y compris le débit massique d'air par convection naturelle ou forcée dans le système capteur-séchoir. On a programmé les équations dans un ordinateur à affichage numérique afin de prévoir le rendement des séchoirs solaires de récoltes.

Résultats des expériences et discussion

Un certain nombre d'expériences ont eu lieu pour déterminer le rendement des séchoirs solaires de récoltes à convection naturelle et à convection forcée. Pendant les essais, on a mesuré divers paramètres comme le rayonnement solaire incident global sur la couverture du capteur, les températures à différents endroits du capteur et de la chambre de séchage, les températures extérieures et l'humidité relative ainsi que la teneur en eau de la récolte. Le rayonnement solaire global a été mesuré à l'aide d'un solarimètre Eppley Black and White et les résultats, consignés par un enregistreur de données. On a mesuré les températures à des intervalles d'une heure grâce à des thermocouples de cuivre-constantan et inscrit les résultats sur un potentiomètre à mini-thermocouple. On a également recouru à des thermomètres à mercure et à des thermomètres gradués à bilame pour mesurer les températures. Pour établir la teneur en eau du produit, on a utilisé un four électrique de laboratoire réglé à 100°C. Pour établir les chutes de pression statique à divers endroits le long des conduites d'air, on s'est servi d'un manomètre à tube en U ou d'équations empiriques appropriées à partir des mesures de température (ASHRAE, 1977); les pressions ainsi calculées ou mesurées ont servi à tracer les diverses courbes caractérisant la circulation d'air forcée par ventilateur dans le système, ou établies par des équations empiriques appropriées (Arinze, 1985; ASHRAE, 1977).

Les expériences se sont poursuivies sur le séchoir solaire à convection forcée du 7 au 12 septembre, plus particulièrement la circulation d'air dans le capteur solaire et dans la chambre de séchage. On avait rempli le bac de séchage de 3,5 t de gousses d'arachides renfermant une teneur initiale en eau de 39 % (à l'état humide). Les figures 8 et 9 présentent les températures, mesurées et prévues par ordinateur, de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur (fig. 8) ainsi que l'apport de chaleur utile du capteur, Q_U (fig. 9), dans le séchoir solaire à convection forcée pendant une journée sous des conditions climatiques moyennes. La figure 8 donne également la mesure du rayonnement solaire horizontal global. La figure 10 illustre le taux d'efficacité des capteurs pendant l'expérience effectuée du 7 au 12 septembre. (Chaque point sur la figure représente l'efficacité horaire du capteur en fonction de $(T_o - T_i)/I_T$ tandis que les données pour chaque journée sont représentées par un signe ou un symbole distinct.)

On avait également rempli la chambre de séchage du séchoir à air non chauffé d'une quantité égale d'arachides renfermant la même teneur en eau. À la fin de chaque jour de séchage, on déterminait par la méthode du four la teneur en eau des arachides dans chacun des deux séchoirs. Les échantillons étaient prélevés dans la section conique de la chambre (jusqu'à 0,6 m de la porte de chargement), dans la section intermédiaire (0,6 m à 1,2 m) et dans la section supérieure (1,2 m à 1,8 m). À la fin de l'essai de séchage dans le séchoir à convection forcée, la teneur en eau des arachides dans les sections inférieure, intermédiaire et supérieure s'établissait respectivement à 10,3 %, 18,4 % et 30,6 % (à l'état humide). Les arachides dans la section inférieure ont donc mis cinq jours à atteindre la teneur en eau désirée sans qu'il soit nécessaire d'apporter un supplément de chaleur. Par contre, la teneur en eau des arachides dans la section inférieure du séchoir à convection forcée sans complément calorifique s'élevait à environ 18 % (à l'état humide), valeur encore trop élevée

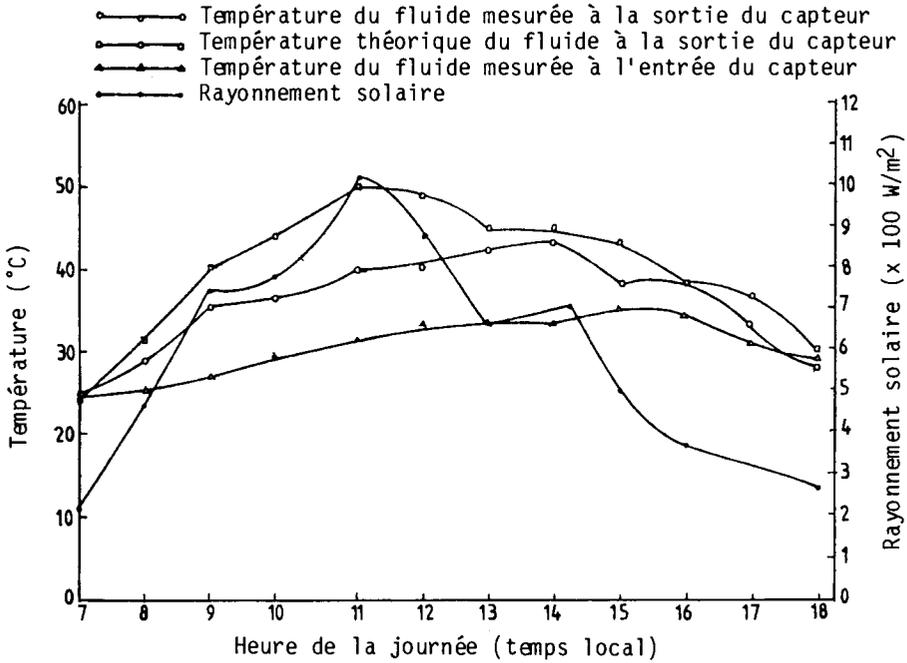


Fig. 8. Températures théoriques et mesurées du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur, 10 septembre 1983.

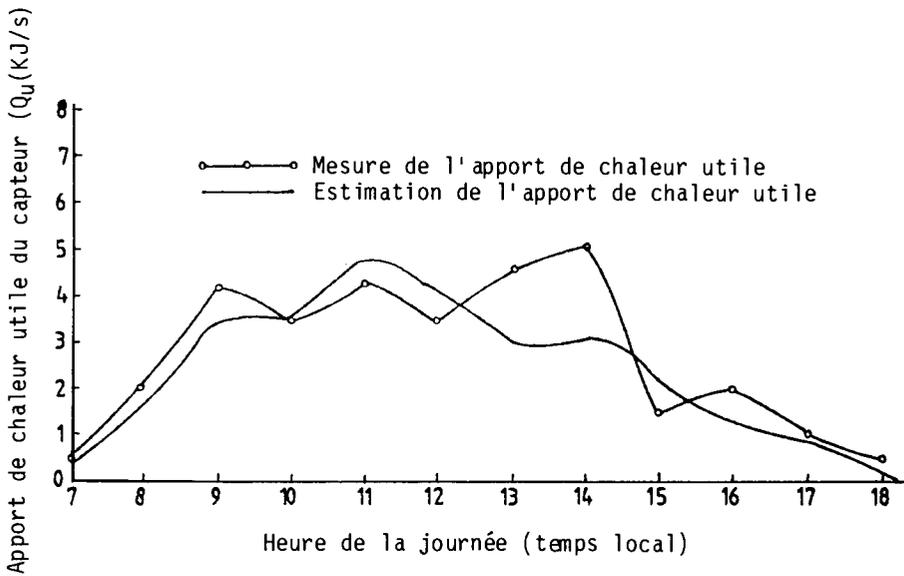


Fig. 9. Valeur mesurée et théorique de l'apport de chaleur utile du capteur, 10 septembre 1983.

après cinq jours de séchage puisque la moisissure commençait déjà à apparaître dans la partie supérieure.

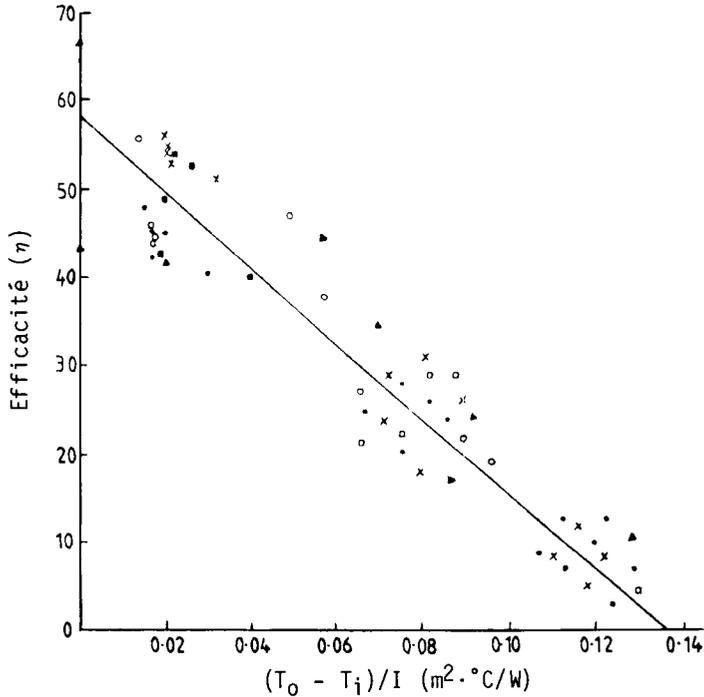


Fig. 10. Courbes expérimentales d'efficacité thermique. Chaque symbole représente les données d'une journée.

Au bout de la cinquième journée, on a vidé une partie des deux séchoirs à convection forcée puisque le séchage dans les sections intermédiaire et supérieure n'était pas assez rapide pour éviter la formation de moisissure ou le réchauffement interne des produits. Pour ce séchoir à lit profond, il serait plus sécuritaire et plus efficace de remplir graduellement le séchoir puisqu'on obtiendra alors un produit de meilleure qualité sans avoir à subir de pertes.

Pendant cinq jours consécutifs en septembre 1984, on a séché une tonne d'épis de maïs frais dans le séchoir solaire à convection naturelle pendant la saison de récolte. Les épis, dont les grains présentaient une teneur initiale en eau de 34,5 % (à l'état humide), ont été étalés sur une profondeur de 0,15 m dans la chambre de séchage. On a ensuite mesuré tous les jours à 19 h la teneur en eau des grains dans les sections inférieure, intermédiaire et supérieure de la chambre de séchage.

Les températures de l'air à l'extérieur, dans le capteur et dans le séchoir solaire pendant l'essai ont habituellement atteint un palier entre 12 h et 14 h (fig. 11). À la fin des cinq jours consécutifs de séchage, les grains avaient une teneur en eau de 11,5 %, 13,3 % et 14,5 % (à l'état humide) respectivement dans les sections inférieure, intermédiaire et supérieure, pour une valeur moyenne de 13,1 % dans tous les séchoirs (fig. 12) : cette teneur en eau moyenne est considérée comme sécuritaire pour l'entreposage. Pour la même humidité de 34,5 % dans les grains, il a fallu 12 jours

consécutifs pour amener à 15,5 % la teneur en eau des épis de maïs étalés à l'extérieur. Ce séchage à l'air libre a été interrompu plusieurs fois par la pluie qui est habituellement très fréquente pendant les mois de juillet, août et septembre dans la région de Zaria.

En septembre 1984, on a réussi à déshydrater en un et deux jours respectivement des tranches d'ignames et de tomates fraîches étalées en couches d'environ 50 mm dans la chambre de séchage du séchoir solaire à convection naturelle. On a également réussi à sécher presque complètement en deux jours des piments frais étalés en couches de 50 mm dans le séchoir solaire. En outre, le 1^{er} mai 1984, 520 kg d'arachides écalées (cacahuètes) renfermant une teneur initiale en eau de 9,8 % (à l'état humide) et étalées uniformément sur une épaisseur de 0,08 m dans la chambre de séchage de 9,8 m ont pu sécher en 12 h (teneur en eau finale de 6,3 %). Il a fallu deux jours ou 48 heures pour amener à une teneur en eau de 6,5 % une quantité d'environ 50 kg de cacahuètes présentant la même teneur en eau initiale (9,8 %) et que l'on avait étalée en une couche de 0,08 m à l'extérieur sur une bâche exposée à l'air libre. Les résultats de ces essais montrent l'avantage évident du séchoir solaire à convection naturelle sur le séchage traditionnel à l'air libre.

Le rendement des séchoirs solaires directs à convection naturelle que l'on décrit ici fluctue en fonction de la quantité de rayonnement solaire absorbée par la récolte exposée au soleil. Arinze (1978) et Arinze et al. (1979) ont déjà montré que le coefficient d'absorption solaire de la plupart des produits agricoles, que l'on détermine par une technique calorimétrique, est comparable à celui d'une tôle galvanisée recouverte d'une peinture noir mat (fig. 13). Lorsqu'on utilise les produits agricoles pour absorber l'énergie solaire, comme on l'a fait dans le séchoir solaire à convection naturelle, leur température sera supérieure à celle de la température de l'air de séchage. Dans ces conditions, la pression de vapeur d'eau dans le produit aura une valeur plus élevée que celle de l'eau dans l'air de séchage. L'eau s'échappera donc du produit même si l'humidité relative de l'air est élevée. Cela est particulièrement avantageux dans les régions tropicales humides ou pendant une opération de séchage sous un ciel nuageux, plus particulièrement dans la partie sud et dans le "middle-belt" du Nigéria.

Conclusion

L'énergie solaire, qui est en abondance suffisante dans la plupart des pays en développement, et plus particulièrement au Nigéria, peut servir à générer de la chaleur pour diverses utilisations résidentielles, industrielles et agricoles. Quelques systèmes à énergie solaire à faible température, comme ceux qu'on utilise pour le séchage des récoltes et le conditionnement des aliments, pour l'approvisionnement en eau chaude et pour la chaleur industrielle, sont maintenant rentables et on recommande fortement leur usage généralisé dans la production agricole et l'industrie afin d'économiser les combustibles fossiles. Le séchage des récoltes est une opération nécessaire au Nigéria ainsi que dans la plupart des pays en développement qui désirent conserver leurs produits agricoles à long terme ou à court terme.

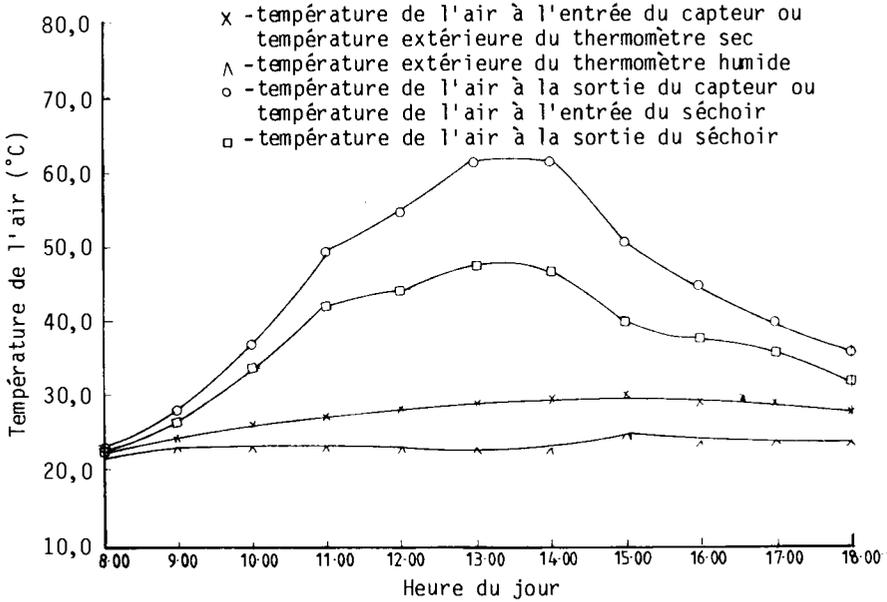


Fig. 11. Mesures horaires typiques de la température de l'air dans le séchoir, dans le capteur et à l'extérieur (air ambiant) pendant le séchage d'épis de maïs dans le séchoir solaire (22 septembre 1984).

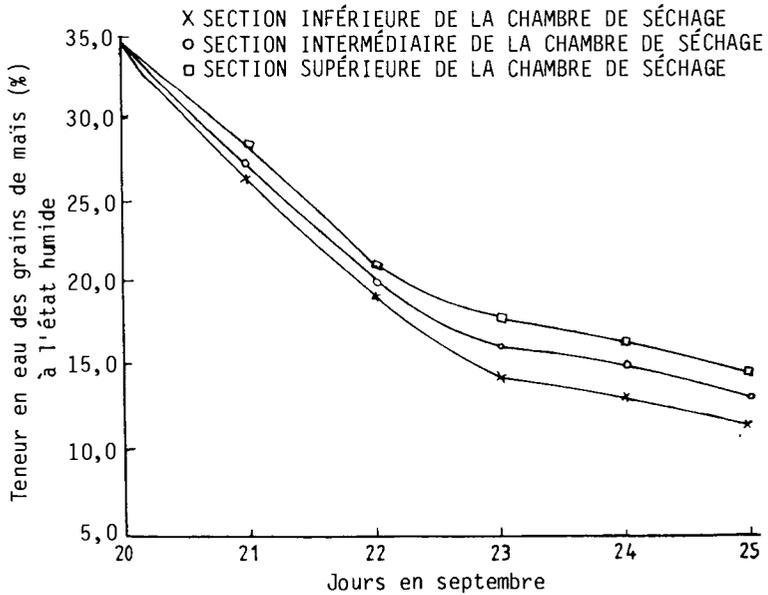


Fig. 12. Mesure quotidienne de la teneur en eau des grains de maïs à trois endroits du séchoir solaire pendant le séchage continu des épis de maïs (20 au 25 septembre 1984).

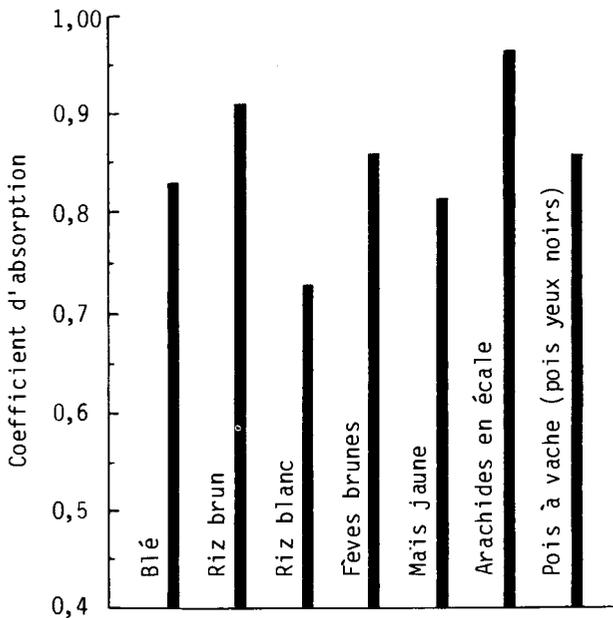


Fig. 13. Coefficient d'absorption de divers produits agricoles par rapport à celui de la peinture noir mat sur tôle galvanisée (= 1,00).

Les résultats des essais sur le séchage solaire des récoltes nous ont révélé que les séchoirs solaires à convection forcée donnaient un bon rendement avec divers produits agricoles sous des conditions climatiques variées. Les séchoirs solaires de récoltes comportent des avantages énormes sur la méthode traditionnelle de séchage à l'air libre (taux de séchage plus rapide et manipulation facilitée). L'utilisation des séchoirs solaires de récoltes peut faire économiser plus de 50 % du temps par rapport au séchage traditionnel à l'air libre et permet de récolter les cultures plus tôt sans crainte qu'elles se détériorent. Les séchoirs solaires peuvent être construits aux dimensions voulues, selon les besoins de l'agriculteur et ses moyens financiers. Il importe de lancer une campagne intensive pour favoriser l'adoption de techniques de séchage solaire pour la conservation à court et à long terme des récoltes au Nigéria et dans d'autres pays tropicaux en développement.

Remerciements -- Nous remercions de leur aide financière et de leur soutien le Département de génie agricole et l'Institut de recherche agricole, Université Ahmadu Bello, Zaria, Nigéria.

Bibliographie

Arinze, E.A. 1978. Solar energy absorption properties of some agricultural products. College of Engineering, Université de la Saskatchewan, Saskatoon, Canada. Thèse M.Sc.

- _____ 1985. Design and performance evaluations of large-scale natural convection solar crop dryer. Paper presented at the National Solar Energy Conference of Solar Energy Society of Nigeria, Enugu, Nigeria.
- Arinze, E.A., Obi, S.E. 1984a. Design and experimental evaluation of a solar energy crop drying system with heat storage. Nigerian Solar Energy Journal, 3, 54-70.
- _____ 1984b. Solar energy availability and prediction in northern Nigeria. Nigerian Solar Energy Journal, 3, 3-10.
- Arinze, E.A., Scheonau, G.J. Bigsby, F.W. 1979. Solar energy absorption properties of some agricultural products. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI, US. Paper No. 79 - 3071.
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers). 1977. ASHRAE handbook of fundamentals. ASHRAE, New York, NY, E.-U.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. 1980. Solar engineering of thermal processes. John Wiley, New York, NY, E.-U.

CONCEPTION, INSTALLATION ET ESSAIS PRÉLIMINAIRES D'UN SÉCHOIR SOLAIRE À CONVECTION NATURELLE DE RÉCOLTES TROPICALES

P.D. Fleming¹, O.V. Ekechukwu², B. Norton¹ et S.D. Probert¹

Résumé — On a construit et mis en service au Centre national de la recherche et du développement énergétiques du Nigéria une installation expérimentale à grande échelle, unique au plan international, pour évaluer le rendement de séchoirs solaires de récoltes. Cette installation permet d'éprouver et d'évaluer le rendement de diverses configurations de séchoirs solaires de récoltes tropicales à convection naturelle. Simultanément, on a mis au point un rigoureux modèle informatisé de simulation du fonctionnement de séchoirs. On a utilisé les données empiriques pour confirmer l'authenticité des estimations produites par le modèle de simulation. On a donc pu identifier les lacunes et apporter les modifications qui s'imposaient au modèle. Le modèle ainsi vérifié servira à établir les configurations optimales des systèmes utilisés pour le séchage de plusieurs récoltes tropicales. Cette installation expérimentale se distingue plus particulièrement par son système informatisé qui analyse et consigne les données provenant de plus de 200 capteurs. Les mesures comprennent la perte d'eau du produit dans le séchoir, les températures de l'air, la vitesse de l'air et l'humidité ainsi que les températures des produits à sécher. En outre, une station météorologique surveille l'humidité et la température de l'air ambiant, la vitesse et la direction des vents, le rayonnement solaire diffus et direct ainsi que les précipitations quotidiennes de pluie. Toute cette masse de données est emmagasinée sur des disques magnétiques qui sont présentement analysés par les chercheurs à Nsukka et à Cranfield. Les analyses permettront de mieux comprendre le fonctionnement des séchoirs solaires de récoltes et de leur proposer des améliorations. C'est la première fois que l'on observe de manière si exhaustive un grand séchoir solaire dans un environnement tropical. La présente communication décrit la conception et le montage de l'installation expérimentale elle-même. Elle décrit également la méthode d'observation du séchoir et présente les données préliminaires illustrant le fonctionnement et le rendement d'un modèle particulier de séchoir.

1. Solar Energy Technology Centre, School of Mechanical Engineering, Cranfield Institute of Technology, Bedford, R.-U.

2. Centre national de la recherche et du développement énergétiques, Université du Nigéria, Nsukka, État d'Anambra, Nigéria.

Introduction

Dans bon nombre de régions rurales du Nigéria, le réseau d'électricité est soit inexistant, non fiable ou trop coûteux. Les systèmes de séchage de récoltes qui utilisent des ventilateurs ou des réchauffeurs électriques ne conviennent donc pas dans ces régions. L'importante mise de fonds et les frais d'exploitation élevés des séchoirs alimentés par des combustibles fossiles constituent de tels obstacles financiers que les petits agriculteurs adoptent rarement ce type de séchoir. Dans ces conditions, les séchoirs solaires à convection naturelle semblent devenir de plus en plus intéressants sur le plan commercial. Le séchoir solaire de récoltes tropicales a l'avantage de nécessiter une plus petite parcelle pour sécher une quantité semblable de produits qu'il n'en aurait fallu dans un système de séchage à l'air libre traditionnel. Un autre avantage est la qualité relativement élevée du produit séché vu que les insectes et les rongeurs sont peu susceptibles d'envahir la récolte pendant le séchage. La période de séchage est raccourcie comparativement au séchage à l'air libre et la récolte est protégée des averses soudaines. Ainsi, la faible mise de fonds et les frais d'exploitation peu élevés de ces séchoirs, combinés à la meilleure qualité des produits après le séchage, permettent à ces systèmes de concurrencer le séchage à l'air libre.

Séchage solaire

Séchage à l'air libre

Les pays tropicaux utilisent deux techniques traditionnelles pour le séchage passif des récoltes :

- La plante à maturité péricite au contact du sol ou bien elle est coupée mais non enlevée, en d'autres mots, le séchage se fait sur place.
- Le produit est placé sur le sol ou sur des claies exposées au rayonnement solaire et aux courants d'air naturels. Il faut déplacer occasionnellement les produits pour les exposer totalement au soleil et ainsi accélérer l'élimination de l'air saturé.

Malgré la nature rudimentaire du processus, de telles techniques sont encore courantes puisque l'énergie nécessaire (c.-à-d. le rayonnement solaire et l'enthalpie de l'air) existe déjà dans l'environnement. En raison de la mise de fonds à peu près inexistante qu'elles exigent, ces techniques représentent souvent les seules méthodes commerciales valables pour sécher des produits agricoles dans les pays en développement. À l'heure actuelle, une forte proportion de l'approvisionnement mondial de fruits et légumes séchés continue d'être séchée à l'air libre. Étant donné que les récoltes sont exposées aux pluies soudaines, aux vents, aux infestations par les insectes et à la contamination par les rongeurs et d'autres animaux, il arrive souvent que la qualité du produit séché se dégrade sérieusement au point d'en empêcher la consommation. Bien qu'on s'emploie actuellement à mettre au point des méthodes de séchage solaire plus efficaces, les techniques traditionnelles comportent cependant trois qualités importantes : une faible mise de fonds, des

frais d'exploitation peu élevés et l'indépendance par rapport aux combustibles.

Séchoirs solaires de récoltes à circulation naturelle

Dans les systèmes à circulation naturelle, l'air réchauffé par le rayonnement solaire circule à travers les produits par effet de thermosiphon ou sous l'effet des vents, ou par une combinaison de ces deux facteurs. Ce type de séchoir est souvent appelé un système passif pour le distinguer de ceux dans lesquels l'air est forcé à travers la récolte à l'aide d'un ventilateur. Dans ce dernier cas, on a affaire à un séchoir solaire actif.

Deux grandes catégories de séchoirs solaires à circulation naturelle ont vu le jour, et ils conservent bien des avantages de la méthode traditionnelle de séchage à l'air libre : ce sont les systèmes distributifs et les systèmes intégrés.

Système distributif

Les produits sont étalés sur des plateaux dans une "boîte de chauffage" (fig. 1) et sont chauffés par un courant d'air qui subit un réchauffement pendant son passage dans un capteur solaire à faible pression, grâce à un effet de thermosiphon (Norton et Probert, 1984). Comme les produits à sécher ne sont pas exposés aux rayons directs du soleil, il ne se produit aucune caramélisation ni surchauffe.

Système intégré

Les produits sont placés dans une chambre de séchage (fig. 2) dont les parois transparentes laissent filtrer le rayonnement solaire nécessaire au séchage. Ce procédé contribue à donner cette couleur verdâtre aux fruits, qui survient, pendant la déshydratation, lorsque la chlorophylle résiduelle se décompose sous l'action des rayons solaires directs. Les principaux inconvénients du système sont la détérioration du produit par surchauffe interne et le taux global de séchage relativement faible imputable à une mauvaise élimination de la vapeur d'eau. Pour surmonter ces problèmes, on peut poser une "cheminée solaire" pour accroître la pression de l'air par effet de thermosiphon. Il y a alors augmentation de la vitesse de l'air et accélération du processus d'élimination de l'eau.

Installation expérimentale

Le séchoir mis à l'essai dans cette étude est du type intégré (fig. 2). Dans la pratique, il est souvent arrivé que ce séchoir ne justifie pas le rendement ou la popularité qu'on lui accordait. Cette situation a été imputable à une mauvaise conception, à un coût en capital relativement élevé, à une faible capacité de séchage et au fait qu'on n'ait pas vraiment cherché à obtenir un produit de haute qualité. Par conséquent, le rendement du séchoir expérimental est optimisé en ce qui touche cinq facteurs :

- l'emploi d'une main-d'oeuvre et de matériaux de construction facilement disponibles localement;

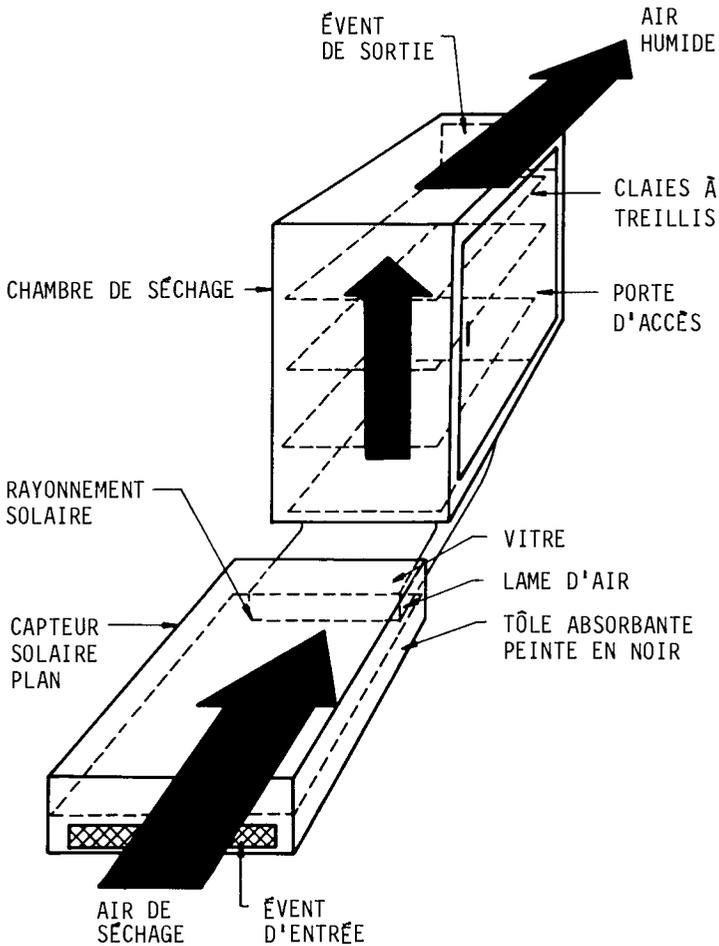


Fig. 1. Séchoir solaire distributif à circulation naturelle (les grosses flèches noires indiquent la direction de l'air).

- sa viabilité commerciale, c.-à-d. un coût en capital peu élevé et des frais d'exploitation faibles;
- de courtes périodes de séchage afin d'accroître la capacité du séchoir;
- une grande capacité de séchage; et
- un produit final de bonne qualité.

Conception du séchoir de récoltes

Le séchoir solaire de récoltes tropicales se compose d'une enceinte transparente semi-cylindrique surmontée d'une cheminée

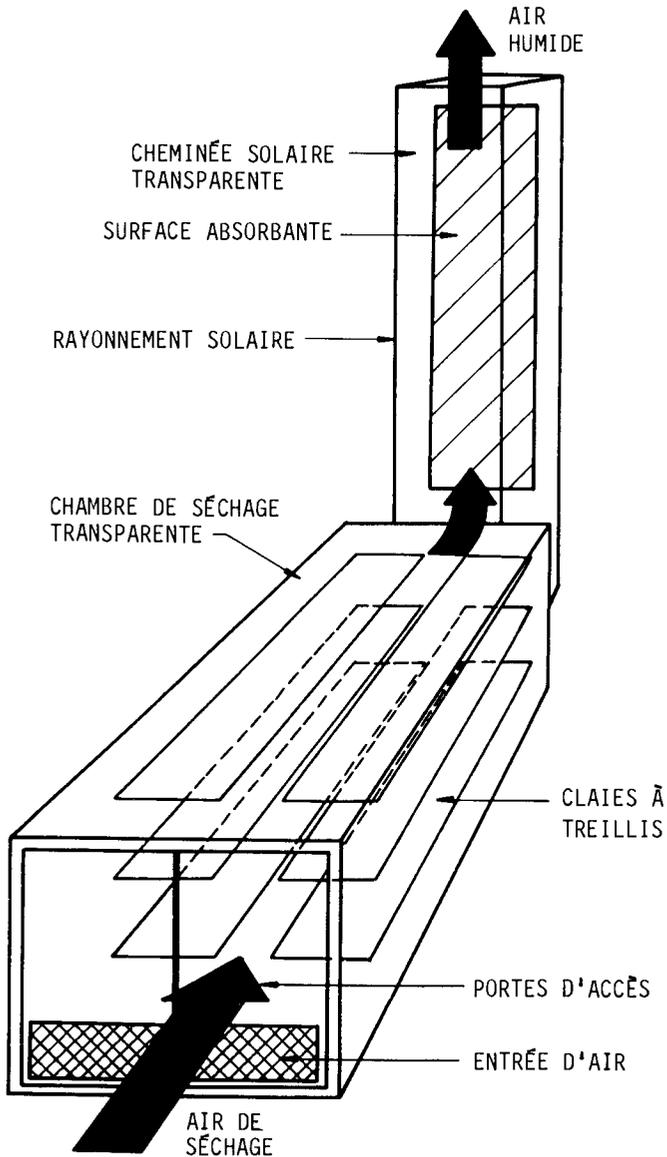


Fig. 2. Séchoir solaire intégré à circulation naturelle (les grosses lignes noires indiquent la direction de l'air).

cylindrique verticale à l'une de ses extrémités (fig. 3). Il s'agit d'une ossature en acier galvanisé relativement simple que l'on recouvre d'une feuille de polyéthylène. L'énergie solaire est donc absorbée par les produits et par un rideau absorbant noir posé à la verticale à l'intérieur de la cheminée. La chaleur captée permet à son tour de réchauffer l'air environnant. À mesure que cet air chaud s'élève et s'échappe par la cheminée, il se produit une aspiration

d'air frais à l'autre extrémité du séchoir. Ce cycle simple ne nécessite aucune énergie supplémentaire et assure une circulation d'air dans le séchoir.

Les principaux paramètres qui influent sur les températures et la circulation d'air à l'intérieur du séchoir sont la hauteur de la cheminée solaire, la superficie et l'emplacement du rideau absorbant dans la cheminée, la longueur du séchoir, le volume d'air pouvant entrer dans le séchoir, la densité des produits dans le séchoir et les caractéristiques de séchage du produit à sécher.

La chambre de séchage était une serre commerciale semi-cylindrique recouverte de plastique que l'on avait modifiée et allongée pour les besoins de notre étude. Vu que les claies de produits à sécher étaient suspendues à des appareils servant à mesurer le poids des produits, l'ossature a été renforcée en conséquence (fig. 4). Les modèles commerciaux qui suivront n'auront pas besoin de cette modification puisque les produits seront placés sur des étagères ou des palettes. Les séchoirs commerciaux devraient donc être plus faciles à construire et d'un coût plus abordable. Outre les modifications de l'ossature, la configuration de la "serre" originale a subi trois autres changements :

- on a construit une charpente supplémentaire à une extrémité du séchoir pour soutenir l'imposante cheminée solaire;
- le revêtement de polyéthylène de la chambre de séchage et de la cheminée solaire a été traité pour pouvoir résister aux climats tropicaux; et
- on a recouvert l'intérieur de la cheminée solaire transparente d'une surface pouvant absorber le rayonnement solaire.

Installation du séchoir solaire

Le séchoir et tout le matériel d'observation ont été montés à l'extérieur, d'abord au laboratoire du Solar Energy Technology Centre situé à Cranfield, R.-U., en juillet 1985. Après évaluation, le devis de construction du séchoir a été modifié en conséquence. Cela nous a également permis de faire subir des essais rigoureux aux capteurs et aux logiciels informatiques. Le séchoir a été installé en dernier lieu au Centre national de recherche et de développement énergétiques à l'Université du Nigéria, Nsukka (6,8° N.). L'endroit a été choisi en raison de l'absence d'ombre et de sa proximité du bâtiment où se trouvait notre matériel d'observation.

On a posé un ruban spécial sur la face externe de la charpente en acier galvanisé pour empêcher que celle-ci ne brûle le polyéthylène, ce qui en aurait abrégé considérablement la durée d'utilisation. Le revêtement de polyéthylène enveloppait complètement la chambre de séchage.

La hauteur de la cheminée solaire pouvait être ajustée par une seule personne en manoeuvrant une corde enroulée sur une poulie au sommet d'un poteau d'acier galvanisé de 6,7 m et attachée au cerceau supérieur de la cheminée.

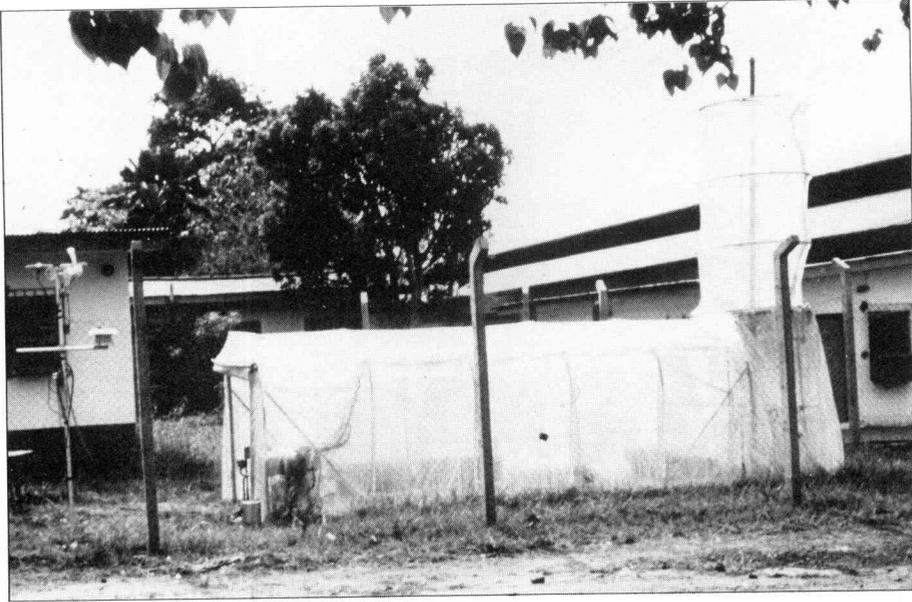


Fig. 3. Sêchoir solaire expêrimental de récoltes tropicales à circulation naturelle, à Nsukka, Nigéria.



Fig. 4. L'imposante charpente interne du sêchoir expêrimental -- claie remplie de manioc.

Système de collecte de données

Le système de collecte de données se trouvait dans un bâtiment adjacent au séchoir et était relié à des capteurs grâce à 14 faisceaux de 12 câbles chacun. Le micro-ordinateur transformait les signaux d'entrée en des valeurs paramétriques qui étaient affichées graphiquement ou compilées à l'écran pour être ensuite stockées dans la mémoire de l'ordinateur.

Un système modulaire regroupant un micro-ordinateur raccordé à des périphériques spécialisés effectuait l'enregistrement des données. L'ordinateur et les périphériques étaient dotés de l'interface IEEE-488, méthode reconnue de configuration d'un système de collecte de données en laboratoire. La puissance du système actuel peut être augmentée presque à l'infini simplement en ajoutant des dispositifs pouvant être raccordés à cette même interface.

Le système se composait du micro-ordinateur, de l'écran, d'une imprimante, d'une unité de disque, de l'interface IEEE-488, de deux systèmes MAPS (systèmes périphériques à multi-application), d'un voltmètre à affichage numérique et de conditionneurs de signaux pour les anémomètres (fig. 5). Les systèmes MAPS balayaient les canaux des capteurs après quoi le voltmètre mesurait la tension reçue à chacun des 105 canaux. Les données recueillies étaient ensuite enregistrées sur un disque souple. Les données actuelles ou antérieures pouvaient être affichées graphiquement ou compilées sur l'écran. En outre, une imprimante à matrice par points permettait d'obtenir des copies en clair.

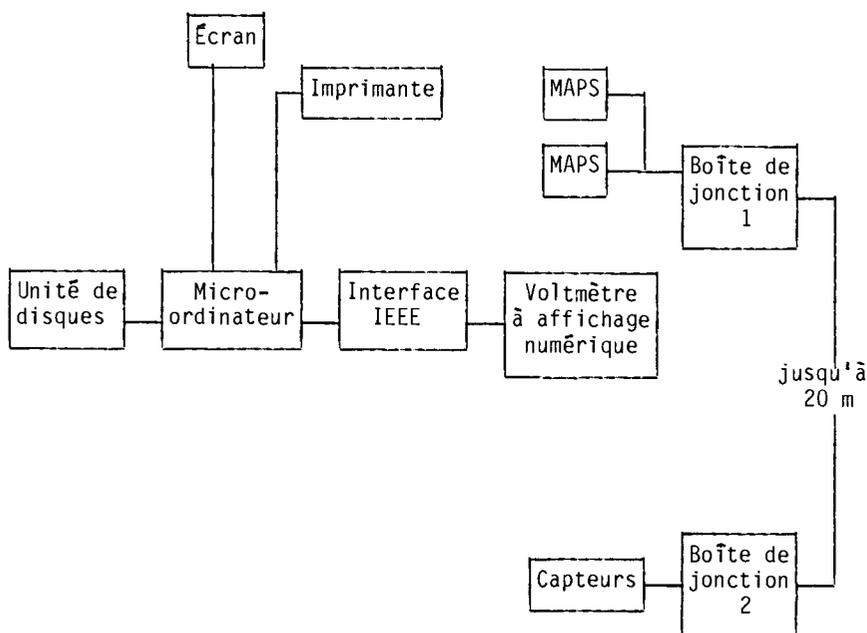


Fig. 5. Schéma du système de collecte de données.

Les boîtes de jonction renfermant les câbles et leurs borniers servaient à acheminer les signaux des capteurs jusqu'aux MAPS. Ainsi, il était possible de débrancher facilement chacun des capteurs du séchoir (c.-à-d. à la deuxième boîte de jonction). Les boîtes pouvaient être situées jusqu'à 20 m l'une de l'autre.

Pour assurer une tension et une fréquence constantes dans l'alimentation de manière à ne pas endommager les composantes électroniques, on a utilisé une alimentation statique sans coupure munie d'un accumulateur de secours de 30 minutes. Ce système nous a permis d'isoler du circuit principal l'alimentation à l'enregistreur de données tout en solutionnant de manière efficace les problèmes de panne, de micro-claquages, de bruits électriques, de chutes de tension et de fluctuations de fréquences.

Les deux micro-ordinateurs étaient des Acorn BBC (modèle B) qui exécutaient deux grandes fonctions : le premier contrôlait le système de collecte de données, l'autre analysait les données reçues. Les données enregistrées étaient stockées sur des disques à double face de 80 pistes capables d'emmagasiner chacun 203 000 octets sur chaque côté. Étant donné que chaque enregistrement exigeait 360 octets, on pouvait stocker 563 enregistrements sur chaque côté de disque. La réception des données se faisant à une fréquence de 48 enregistrements par jour, c.-à-d. un tous les 30 minutes, chaque disque pouvait emmagasiner les données de 22 jours.

Le tableau 1 présente le détail des capteurs servant à l'acquisition des données. Tous les capteurs produisaient une sortie de tension (mV) sauf ceux utilisés pour les précipitations et la température/humidité. Ces derniers généraient une sortie de courant (mA) directement proportionnelle à la température ou à l'humidité. On a donc utilisé des cartes de terminaison courant-tension pour permettre au voltmètre de lire le signal de sortie sous forme d'une tension. Pour mesurer les précipitations, chaque pointe de touche dans le seau fermait les circuits d'un compteur d'événements. Comme le module du compteur pouvait recevoir cinq signaux d'entrée, il en restait quatre non utilisés.

Logiciel

Les logiciels de manipulation et de collecte des données mis au point aux fins de ce projet comportaient deux éléments principaux : le programme de collecte de données et les programmes de dépouillement, d'analyse et de présentation des données.

Le programme principal, qui se déroulait sur un micro-ordinateur, contrôlait le fonctionnement du matériel d'enregistrement des données, affichait l'heure des observations et emmagasinait les données sur les disques souples. Il pouvait donc exécuter les opérations suivantes :

- calculer continuellement le temps réel;
- balayer tous les capteurs, selon le cas, et prendre les lectures de capteurs particuliers sous des conditions à vide;
- appliquer les facteurs de conversion (et, au besoin, les zéros de décalage) à toutes les lectures des capteurs afin d'obtenir les valeurs techniques appropriées;

- stocker les valeurs techniques de base sur des disques souples;
- afficher sous forme de tableau sur l'écran de visualisation toutes les données enregistrées à une heure donnée;
- afficher sous forme de tableau sur l'écran de visualisation toutes les données d'un type particulier de capteur pour une période de 2,5 heures;
- afficher sous forme de tableau des lectures antérieures d'un capteur particulier;
- afficher les lectures des cellules de charge à vide (c.-à-d. les valeurs des zéros de décalage); et
- tracer sur l'écran de visualisation les valeurs précédentes d'un capteur particulier.

Vu que le système comprenait des voies inoccupées, il pouvait facilement manipuler les données d'autres capteurs, ce qui justement avait été prévu dans le logiciel. Toutes les lectures des voies faites par le voltmètre à affichage numérique étaient emmagasinées sur le disque, peu importe qu'il y ait un capteur sur la voie en question; toutefois, l'écran n'affichait que les valeurs réelles.

L'ordinateur d'analyse des données était complètement indépendant de l'ordinateur d'observation, ce qui permettait de surveiller continuellement l'installation expérimentale. Cependant, dans la réalité, seules les données climatiques ont été consignées de manière continue (les valeurs moyennes étant enregistrées toutes les 30 minutes) alors que la surveillance du séchoir ne s'effectuait qu'au moment d'un essai. L'une des deux unités de disque servait à enregistrer les données climatiques alors que l'autre consignait les données provenant du séchoir et de la station météorologique.

Données expérimentales

Nous avons obtenu des données expérimentales du séchoir sous diverses conditions climatiques. Les figures 6 à 11 illustrent la fluctuation diurne des paramètres du système et des conditions qui existaient pendant un essai effectué au mois de mai 1986. Le produit à sécher était du manioc coupé en cubes grossiers (environ 0,02 m x 0,02 m).

La fluctuation diurne du rayonnement solaire direct, diffus et global pendant l'essai (fig. 6) indique un apport relativement élevé du rayonnement solaire. L'effet de la réduction soudaine d'insolation vers 14 h est clairement indiqué aux figures 7 à 11. À la figure 7, l'humidité relative ambiante monte après 14 h pendant que la température dans le séchoir régresse (fig. 8), que l'humidité relative de l'air augmente (fig. 9) et que la température au sol baisse (fig. 10) pendant cette période. Toutefois, la diminution d'intensité dans le rayonnement solaire a moins d'influence sur la température au sol que la température de l'air à l'intérieur de la chambre de séchage (comparer les fig. 8 et 9).

Tableau 1. Capteurs utilisés pour observer le rendement du séchoir.

Type de capteur	Paramètre mesuré	Nombre de capteurs		Unité utilisée
		Posés	Possibles	
Cellule de charge	Perte de masse	15	30	kg
Thermocouple	Diverses températures	20	20	°C
Thermomètre/ hygromètre	Température de l'air	15	15	°C
	Humidité de l'air	15	15	%
Anémomètre	Vitesse de l'air	12	14	m/s
Solarimètre et bande d'ombre	Rayonnement solaire diffus	1	1	W/m ²
Solarimètre	Rayonnement solaire global	1	1	W/m ²
Anémomètre	Vitesse du vent	1	1	m/s
Girouette	Direction du vent	1	1	degrés
Thermomètre à résistance de platine	Température des thermomètres sec et mouillé	1	1	°C
		1	1	°C
Pluviomètre	Précipitations quotidiennes	1	5	mm/jour

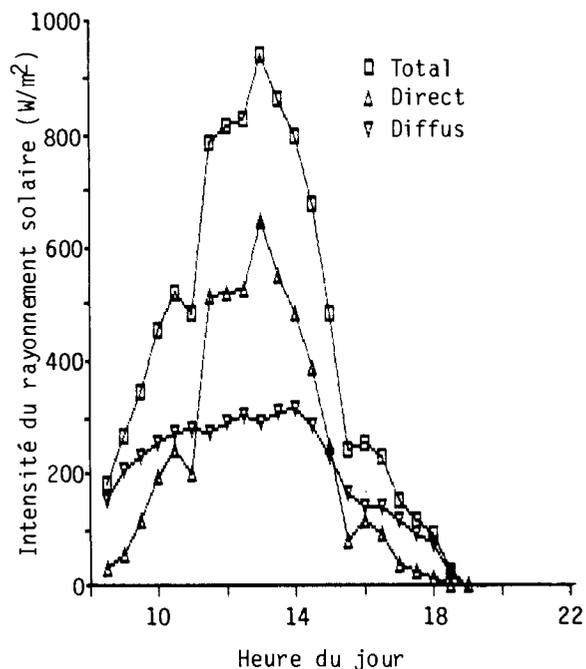


Fig. 6. Fluctuation diurne de l'intensité du rayonnement solaire.

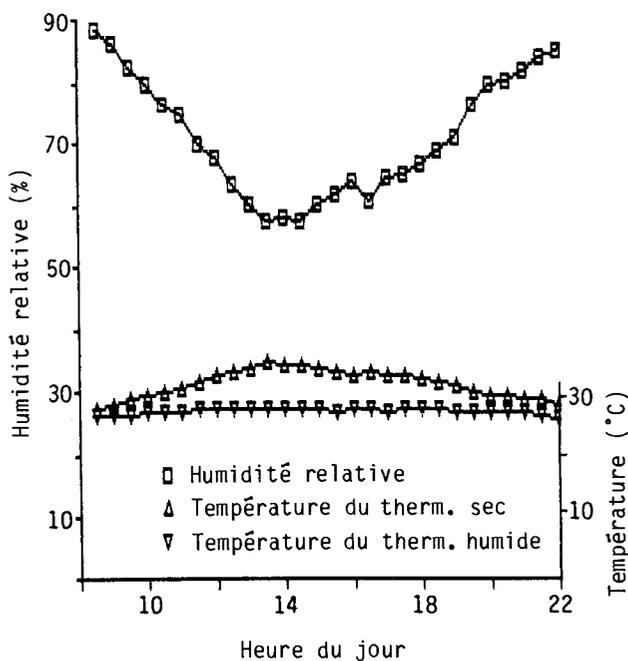


Fig. 7. Fluctuation diurne de l'humidité relative et des températures des thermomètres sec et mouillé.

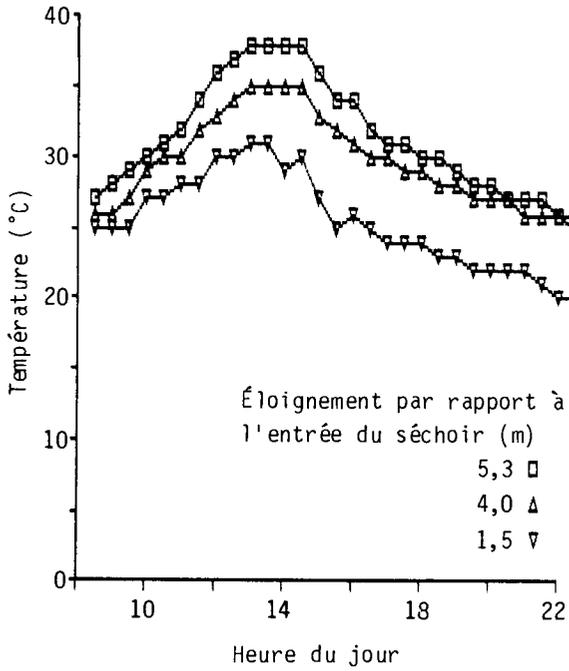


Fig. 8. Fluctuation diurne de la température au sol à trois endroits dans la chambre de séchage.

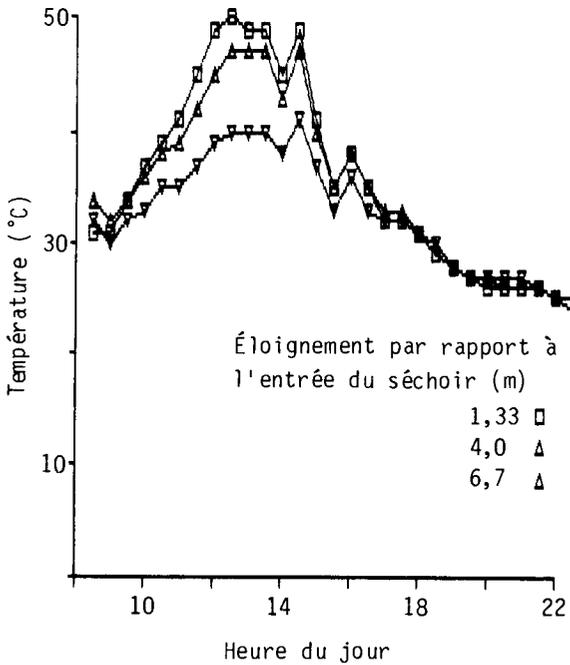


Fig. 9. Fluctuation diurne de la température à l'air (à 1,8 m au-dessus du sol) à trois endroits dans la chambre de séchage.

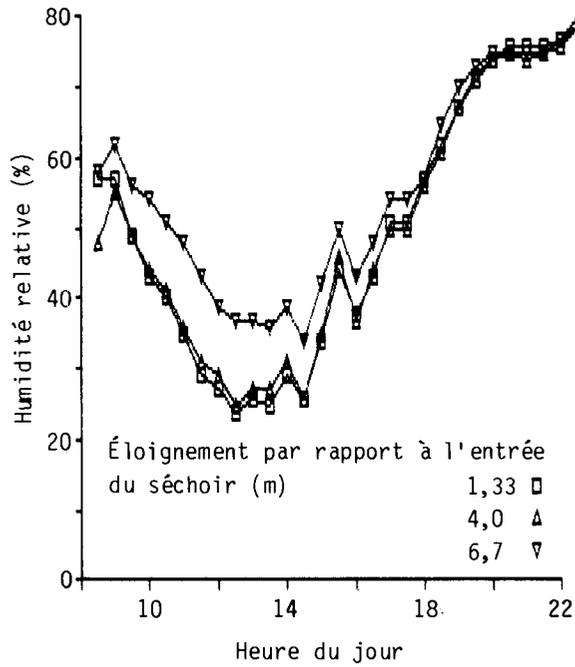


Fig. 10. Fluctuation diurne de l'humidité relative de l'air (à 1,8 m au-dessus du sol) à trois endroits dans la chambre de séchage.

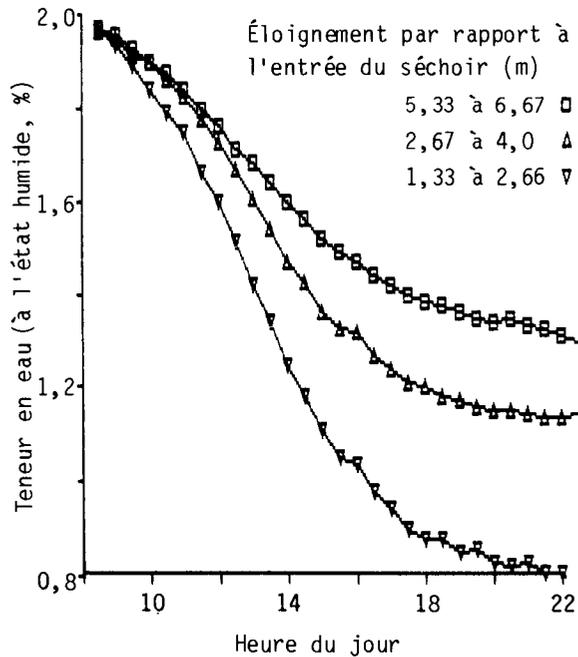


Fig. 11. Profil de la durée de séchage de cubes de manioc à trois endroits dans la chambre de séchage.

Bien que la température au sol s'accroisse au périmètre du séchoir (fig. 8), le produit sèche plus rapidement près de l'entrée du séchoir lorsque l'air circule à la vitesse indiquée de 0,5 m/s (fig. 11). En effet, étant donné que l'air près de l'entrée du séchoir est à la fois plus chaud (fig. 9) et plus sec (fig. 10) que celui dans la section intermédiaire ou à la sortie de la chambre de séchage, il peut absorber l'eau du produit à mesure qu'il circule vers l'autre extrémité du séchoir.

La température de l'air dans la chambre de séchage était beaucoup plus élevée que la température ambiante (jusqu'à 15°C) et l'humidité relative de l'air de séchage est tombée soudainement à environ 25 %, comparativement à une humidité ambiante d'environ 60 %. L'air à l'intérieur de la chambre a donc une plus grande capacité de séchage que l'air ambiant. Les résultats de l'essai sur le manioc (fig. 11) n'ont rien à envier à ceux des autres essais de séchage solaire du manioc (Roa, 1974).

Recherche future

La recherche expérimentale se poursuivra à Nsukka pendant encore quelque temps afin de recueillir le plus de données possibles sur le rendement d'un séchoir sous diverses conditions climatiques et avec différents produits. Bien que ce séchoir expérimental ait été fabriqué au Royaume-Uni, nous mettons actuellement au point des modèles et évaluons la faisabilité d'en fabriquer un au Nigéria pendant le deuxième volet du programme de R&D. Ces séchoirs de deuxième génération seront entièrement conçus et construits au Nigéria en utilisant le matériel, la main-d'oeuvre et les matériaux locaux. Les essais sur le terrain de ces nouveaux séchoirs fabriqués au pays devraient débiter en 1987.

Nous prévoyons aborder trois grands domaines complémentaires de recherche dans les projets futurs.

Mise au point de graphiques de conception de séchoirs solaires

Il n'y a à l'heure actuelle aucun graphique de conception de séchoirs solaires. Toutefois, les modèles de simulation assistés par ordinateur qui sont présentement étudiés pour décrire le fonctionnement du séchoir et prévoir son rendement serviront à concevoir les graphiques en question. Dès que nous les aurons mis au point, ils permettront aux agriculteurs et aux vulgarisateurs agricoles de décider sur le champ si le séchoir solaire à circulation naturelle convient à une région géographique ou à un produit donné, tout en indiquant clairement le modèle de séchoir le plus approprié.

Isolément des caractéristiques de séchage des récoltes tropicales

Au cours de la présente étude, on a pu constater que les caractéristiques de séchage de bien des récoltes tropicales, et surtout de tubercules, n'étaient pas parfaitement claires. Des renseignements aussi essentiels sont indispensables pour bien concevoir un séchoir de récoltes tropicales. Les activités futures de recherche devraient donc comprendre un programme visant à établir de façon précise ce type de renseignement empirique.

Évaluation des séchoirs de fabrication locale et de leur efficacité

L'étape suivante du projet devrait porter sur la fabrication locale de séchoirs adaptés à des récoltes particulières et à des endroits précis. Ces séchoirs seraient soumis aux contraintes normales d'exploitation et leur rendement serait observé jusqu'à un certain niveau. Plusieurs séchoirs seraient installés à Nsukka de manière à pouvoir les observer en même temps et les comparer à ceux qui font l'objet d'une exploitation réelle et ainsi qu'aux méthodes existantes de séchage.

Conclusion

Les conclusions obtenues de l'installation expérimentale au Nigéria ont confirmé les caractéristiques supérieures de séchage des séchoirs solaires intégrés à effet de thermosiphon par rapport à la technique traditionnelle de séchage à l'air libre. De façon plus particulière, les températures de l'air et les taux d'humidité à l'intérieur de la chambre de séchage conviennent au séchage du manioc.

On met actuellement au point un modèle global de simulation informatique afin de décrire le fonctionnement du séchoir et de prévoir sa capacité de séchage pour une vaste gamme de produits. À partir de ces premières simulations, on modifiera les modèles de manière à tenir compte d'un grand nombre de séchoirs solaires à circulation naturelle. Ces modèles contribueront à la mise au point d'une série de graphiques de conception des séchoirs solaires qui permettront aux agriculteurs de décider facilement si un séchoir solaire convient à leur région et à leur récolte. Si c'est le cas, les graphiques indiqueront clairement le modèle le plus approprié.

Remerciements -- Nous désirons remercier de leur aide financière la Commission des communautés européennes située à Bruxelles, Belgique, ainsi que le British Council de Londres, Royaume-Uni.

Bibliographie

- Norton, B., Probert, S.D. 1984. Solar energy stimulated, open-looped thermosyphonic air-heaters. *Applied Energy*, 17, 217-234.
- Roa, G. 1974. Natural drying of cassava. Department of Agricultural Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI, É.-U.. Thèse de doctorat.

EVALUATION DE TROIS TYPES DE SÉCHOIRS SOLAIRES DE RÉCOLTES AU NIGÉRIA

J.C. Igbeka¹

Résumé — On a comparé trois types de séchoirs solaires — un capteur solaire à concentration avec chambre de séchage, un capteur solaire plan avec séchoir et bac de stockage et un capteur plan avec séchoir. Dans les deux derniers cas, le produit lui-même absorbe la chaleur solaire. Bien que le capteur à concentration ait donné l'écart de température le plus élevé, il a aussi présenté le plus faible taux de séchage. Le troisième type de séchoir a donné le meilleur résultat; cependant, la version modifiée du deuxième modèle a été recommandée pour les agriculteurs ruraux. Cette communication présente aussi des recommandations pouvant aider les concepteurs de séchoirs solaires. On a aussi étudié les facteurs qui influent sur l'efficacité de séchage des séchoirs sous le climat humide des tropiques. Les séchoirs solaires ont mieux fonctionné en saison chaude et sèche pendant la saison des pluies. Les saisons ont également influé sur la teneur en eau des produits au moment de la récolte. On a constaté que les critères socio-culturels des agriculteurs ne les empêchaient pas d'adopter des séchoirs solaires. Enfin, on a fait ressortir le besoin d'utiliser des matériaux locaux pour la construction des séchoirs solaires.

Introduction

Selon les estimations, les réserves pétrolières du Nigéria devraient durer encore 20 ans; le pays doit donc tirer davantage de l'ensoleillement qu'il reçoit toute l'année de par son emplacement géographique sous les tropiques. La partie méridionale humide du pays, représentée par la ville d'Ibadan, affiche sa plus faible moyenne mensuelle d'ensoleillement (88 heures) en août (saison nuageuse et pluvieuse) mais peut recevoir jusqu'à 235 heures d'ensoleillement par mois de novembre à janvier (c'est la saison chaude et sèche) (Igbeka, 1980). Toutes ces valeurs sont plus élevées dans la savane, dans le Nord du pays.

L'énergie solaire n'a pas tardé à devenir une source d'énergie de plus en plus utilisée étant donné l'épuisement accéléré des combustibles conventionnels. Si on la préfère aux autres sources d'énergie comme le vent et les schistes, c'est parce qu'elle est abondante, inépuisable et non polluante. En outre, on peut la capter

1. Département de génie agricole, Université d'Ibadan, Ibadan, Nigéria.

à un coût relativement faible et elle ne présente aucun danger d'incendie ni les autres risques associés aux autres combustibles. Par conséquent, on ne saurait trop insister sur l'utilisation et l'application de l'énergie solaire dans le développement rural.

L'une des applications de l'énergie solaire est le séchage de produits agricoles et alimentaires. Toutefois, un grand nombre de cultures différentes se pratiquent au Nigéria, selon l'emplacement, et le séchage solaire de ces cultures ou des denrées alimentaires sera fonction de plusieurs facteurs : température moyenne, humidité relative et insolation ou ensoleillement de l'endroit; teneur initiale en eau de la récolte et statut socio-économique des habitants. L'un des problèmes de base à l'utilisation des séchoirs solaires au Nigéria tient à l'humidité relative élevée de l'air, surtout dans la partie méridionale du pays; à la teneur en eau élevée des cultures au moment de la récolte et, quelques fois, à la faible insolation pendant la période de récolte.

La présente communication vise quatre objectifs : d'abord, examiner les travaux effectués sur les applications de l'énergie solaire, plus particulièrement dans le séchage des aliments, au Nigéria; deuxièmement, analyser et comparer trois types de séchoirs solaires; troisièmement, isoler les facteurs socio-économiques qui influent sur l'application des séchoirs solaires dans les régions rurales et quatrièmement, recommander les domaines futurs de recherche et de développement. Il convient de souligner que seuls seront examinés les systèmes solaires passifs puisque ce sont ceux qui s'adaptent le mieux aux régions rurales.

Examen des travaux antérieurs au Nigéria

La plupart des travaux de recherche sur l'application de l'énergie solaire au Nigéria ont été effectués dans les départements de physique, de génie mécanique et de génie agricole des universités nigériennes ainsi que dans certaines institutions de recherche. Malheureusement, la majorité des travaux en cause n'ont donné lieu à aucune publication, mais uniquement à des rapports diffusés à l'intérieur des diverses institutions. Il a donc été très difficile d'examiner tout ce qui s'était fait dans le domaine de l'énergie solaire. Le seul endroit qui se prête à une coordination et à un échange de vues est la conférence annuelle de la Société de l'énergie solaire du Nigéria. Les communications présentées à cette conférence paraissent pour la plupart dans le Nigerian Journal of Solar Energy.

L'un des objectifs de la recherche sur l'énergie solaire consiste à isoler les paramètres initiaux, particulièrement le rayonnement solaire pouvant être capté, soit par observation directe (Ezeilo, 1979; Bamiro et Ideriah, 1982; Doyle, 1982; Ideriah et Bamiro, 1982), soit à l'aide de modèles mathématiques (Ezekwe et Ezeilo, 1981; Ideriah, 1981; Arinze, 1982; Bamiro, 1983). À cause de leur formation et expérience, ces chercheurs s'intéressaient beaucoup plus au rendement des capteurs qu'à l'application de l'énergie ainsi obtenue.

Quelques travaux sur les applications de l'énergie solaire ont touché le chauffage de l'eau et le stockage d'énergie dans les piles photovoltaïques pour le pompage de l'eau et la réfrigération. Tani (1979), travaillant à l'Institut international d'agriculture tropicale

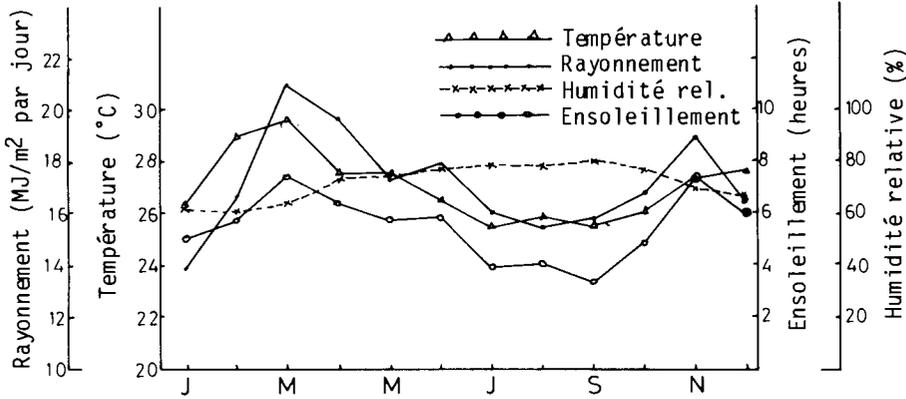


Fig. 1. Moyenne mensuelle du rayonnement quotidien total, de la température, de l'humidité relative et de l'ensoleillement à Ibadan, Nigéria.

(IIAT) à Ibadan, a capté et entreposé de l'énergie solaire dans des piles photovoltaïques pour l'utiliser ensuite dans l'éclairage, le pompage de l'eau et la mise en service d'un réfrigérateur en milieu rural. Parallèlement, une foule de données météorologiques ont été recueillies à cette station : heures d'ensoleillement, insolation, humidité relative et température quotidienne moyenne (fig. 1).

Un troisième élément de la recherche sur l'énergie solaire concerne l'élaboration d'appareils. Chendo et Schmitter (1982) ont étudié le rendement d'un alambic solaire recouvert de Perspex. Ils ont constaté que le Perspex était préférable au verre en région rurale à cause de sa plus grande résistance au bris par un animal ou une pierre perdue. Araoye (1984) a d'ailleurs confirmé cette affirmation lorsqu'il a évalué le rendement d'un système intégré séchoir/bac d'entreposage.

Adebiyi (1982) a conçu, construit et évalué un réchauffeur solaire à vapeur fabriqué avec des matériaux locaux. Ses résultats indiquent une efficacité globale de 69 %, ce qui est assez élevé. Son modèle a été largement adopté dans les régions rurales du Nord du pays.

Séchoirs solaires

La recherche sur le séchage solaire est en cours depuis 10 ans au Nigéria, surtout dans les départements de génie agricole et mécanique, les universités et collèges polytechniques. Certains travaux ont déjà été publiés dans des comptes rendus de journaux ou de conférences, mais d'autres demeurent inédits bien qu'ils aient paru sous forme de rapports de projet.

Ofi (1982) a construit et évalué un séchoir solaire muni d'un capteur plan. Bien qu'il n'y ait mis aucun produit à sécher, il a réussi à obtenir dans la chambre de distribution une température d'environ 50°C supérieure à la température ambiante sous un ensoleillement maximum. Ses calculs indiquent un rendement global de 30 %.

Awachie (1982) a utilisé une boîte solaire de chauffage pour sécher du poisson, de la noix de coco et du maïs. Il a obtenu des températures de l'air variant entre 40° et 50°C dans la chambre pendant les saisons des pluies, et des températures supérieures à 50° pendant les saisons sèches. Il a indiqué qu'une masse de 0,74 kg de noix de coco avait perdu 0,143 kg d'eau en moins de 24 heures et que du poisson frais non coupé avait pu être séché en moins de 72 heures, la perte d'eau s'élevant à environ 50 % dans les 24 premières heures.

Arinze (1985) a réussi à concevoir un séchoir solaire commercial pour le maïs et d'autres céréales pouvant répondre aux besoins des agriculteurs du Nord du Nigéria. Certains États du Nord utilisent déjà ce séchoir et d'autres ont passé des commandes supplémentaires.

Avant 1980, les universités de Nigéria, Nsukka et Ife avaient effectué des essais sur quelques séchoirs solaires expérimentaux. En 1980, un rapport a décrit la mise au point et l'évaluation d'un séchoir solaire muni d'un capteur à réflexion/concentration dans lequel du maïs épluché et du plantain en tranches avaient été séchés (Igbeka, 1980). Ce séchoir a servi par la suite pour d'autres produits. Plus tard, on a utilisé un capteur plan pour réchauffer l'air dans un séchoir renfermant du maïs et du gombo tranché (Igbeka, 1982); Araoye (1984) a modifié ce séchoir pour y intégrer un bac de stockage et les résultats obtenus ont été très satisfaisants. En 1985, on a conçu et évalué un séchoir solaire dans lequel le produit à sécher servait également à absorber la chaleur. Nous exposons ici les données et les résultats de ces trois modèles.

Évaluation de trois types de séchoirs solaires

On peut classer en trois catégories les séchoirs solaires disponibles au Nigéria : séchoir avec capteur à concentration, séchoir avec capteur plan et unité combinant capteur plan, séchoir et bac d'entreposage. Ces séchoirs peuvent être actifs ou passifs mais nous nous sommes limités ici aux systèmes passifs puisqu'ils sont mieux adaptés aux régions rurales. Notre étude a été effectuée de mai à novembre.

Séchoir avec capteur solaire à concentration

Le capteur solaire à concentration n'est pas habituellement utilisé dans le séchage des récoltes. Il figure avec les deux autres séchoirs puisqu'il a été le premier capteur à être construit à Ibadan. Le séchoir solaire se compose d'un capteur et d'une chambre de séchage (fig. 2). Le capteur, qui est un système fixe à concentration, comporte quatre tôles réfléchissantes montées sur une structure parabolique et isolées de celle-ci par une couche de 3 cm de fibres de noix de coco. L'ossature est en contre-plaqué (Igbeka, 1980) et forme une parabole ayant une distance focale de 25 cm. Les autres composantes du capteur comprennent un tuyau d'aluminium peint en noir (145 cm de longueur sur 5 cm de diamètre extérieur) fixé dans l'axe du point focal du miroir parabolique. Le tuyau est retenu concentriquement à l'intérieur d'un tube de verre (129 cm de longueur sur 8,8 cm de diamètre) à l'aide de deux bondes de bois. Une pellicule transparente de fluorure de polyvinyle (FPV) de 0,15 cm d'épaisseur a servi de couverture. De cette manière, tous les rayons perpendiculaires à la surface du miroir sont réfléchis et concentrés

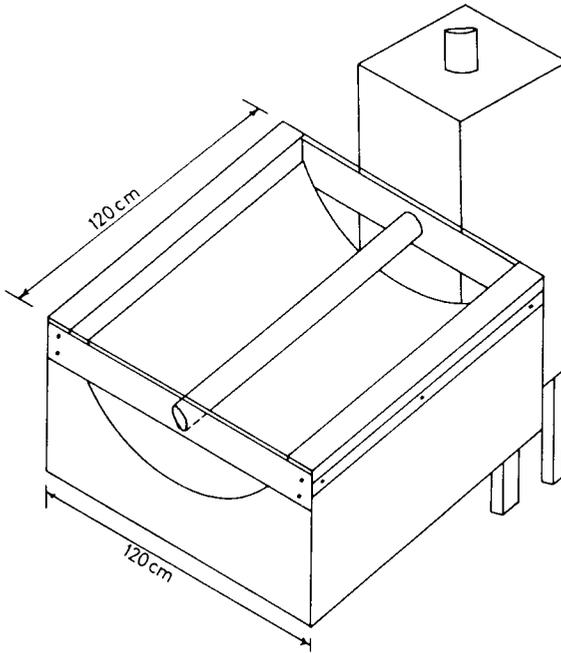


Fig. 2. Dimensions du sècheoir avec capteur à concentration.

sur le tuyau d'aluminium noir. La parabole est inclinée de 10° par rapport à l'horizontale.

L'enceinte de séchage est une boîte en contre-plaqué de 1,27 cm dont les parois sont isolées de fibre de verre. C'est dans cette boîte de 48 x 48 x 123 cm comprenant une chambre de distribution de 25 cm de haut que le tuyau d'aluminium du capteur entre dans un trou de 5,3 cm. Au-dessus de la chambre de distribution se trouve un faux plancher fait de treillis métallique. La chambre de séchage est construite de façon à pouvoir utiliser le sècheoir avec ou sans claies de séchage, et le maïs peut y être séché en épis ou épluché. L'évaluation du sècheoir s'est faite avec des tranches de plantain et du maïs épluché. Au cours des essais, on a eu recours à de l'okra haché, du sorgho, du riz en paille et du maïs en épis. Ce sècheoir a été désigné sècheoir numéro 1.

Sècheoir à capteur plan

Le sècheoir à capteur plan est composé d'un capteur plan (3,66 m x 0,95 m) recouvert de vitre ainsi que d'une chambre de séchage en contre-plaqué (fig. 3). La surface absorbante du capteur est une tôle ondulée en acier galvanisé que l'on a peinte en noir. La base et les côtés de la structure métallique qui retient la tôle sont isolés avec de la fibre de verre d'une densité de 200 kg/m^3 et d'un coefficient surfacique K de $0,038 \text{ W/m par } ^\circ\text{K}$. Les parois de la chambre de séchage sont également isolées avec de la fibre de verre.

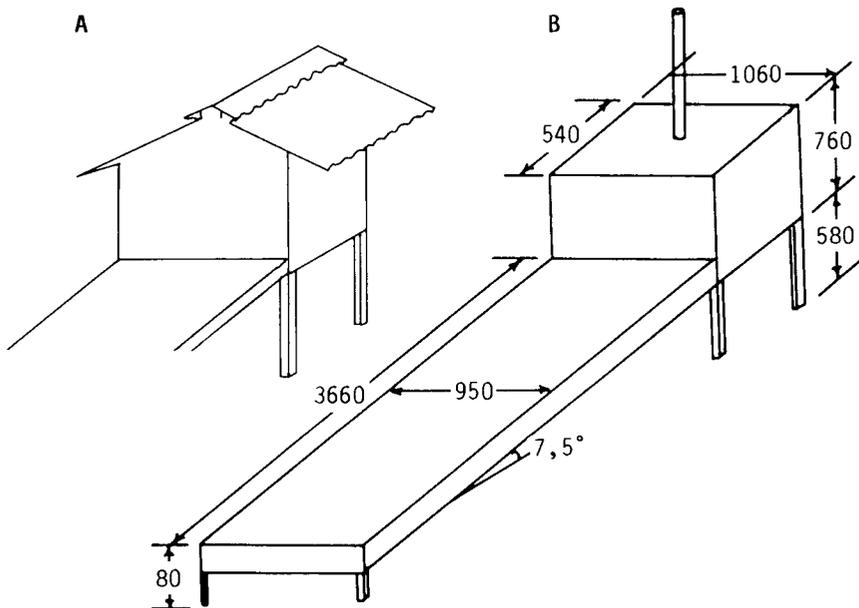


Fig. 3. Sêchoir solaire avec capteur plan : avec bac d'entreposage (A) ou chambre de sêchage avec cheminêe (B).
(Les dimensions sont en millimêtres.)

La surface utile du capteur est de $3,22 \text{ m}^2$ alors que le passage d'air a une section de $0,0285 \text{ m}^2$. Le sêchoir comporte une chambre de distribution et un faux plancher de treillis mêtallique. Le haut du sêchoir est recouvert d'une tôle ondulêe transparente et surmontê d'une cheminêe (50 cm de longueur). Il a êtê désigné sêchoir numêro 3. Le sêchoir a êtê êvaluê avec du maïs, êpluchê ou en êpis, des tranches de plantain, de l'okra hachê, du sorgho et du riz en paille.

Sêchoir - bac d'entreposage combinê avec capteur plan

Le capteur de cette unitê combinêe est le mêmê que pour le sêchoir numêro 3 tandis que le bac de sêchage a la mêmê taille et construit avec les mêmes matêriaux. Toutefois, la couverture est faite de feuilles transparentes en plastique ondulê de façôn à prêsenter un faîte triangulaire fonctionnant à la maniêre d'une cheminêe (fig. 3). Dans cette configuration, le toit agit comme un êmetteur de chaleur solaire alors que le produit dans la partie supêrieure du bac joue le rôle d'un absorbeur. Le reste est semblable au sêchoir numêro 3. Ce sêchoir a êtê appelê sêchoir numêro 2.

Le sêchoir a êtê êvaluê avec du maïs êpluchê, du maïs en êpis, des tranches de plantain et d'igname, de l'okra hachê, du sorgho et du riz en paille.

Résultats et discussion

Rendement des séchoirs

On a évalué le rendement des séchoirs selon deux critères : le taux de séchage, qui correspond à la quantité d'eau évaporée par une unité de surface absorbante par jour [kg (H₂O)/m² par jour] et l'efficacité du séchage solaire. Les figures 4 et 5 présentent les résultats des essais de séchage sur trois types de grains. En outre, les figures 6 et 7 illustrent les courbes de séchage du plantain tranché et du maïs épluché.

L'efficacité du séchage solaire, η , a été définie comme le rapport entre l'énergie utilisée pour évaporer l'eau hors des grains et le rayonnement solaire sur la surface absorbante :

$$\eta = 100 \left[\int_0^t (M_w r / I) dt \right] \quad [1]$$

où

M_w = taux de séchage [kg (H₂O)/m² par heure],

r = chaleur de vaporisation de l'eau hors du grain [W/h par kg(H₂O)], et

I = rayonnement solaire (W/h par m²)

Les résultats représentent des moyennes sur six mois pendant lesquels la moyenne quotidienne du rayonnement minimum s'est établie à 15,1 MJ/m² et le rayonnement maximum, à 21,6 MJ/m². On a constaté que les séchoirs 2 et 3 étaient plus efficaces que le séchoir 1. Bien que le capteur 1 ait affiché l'écart de température d'air le plus élevé,

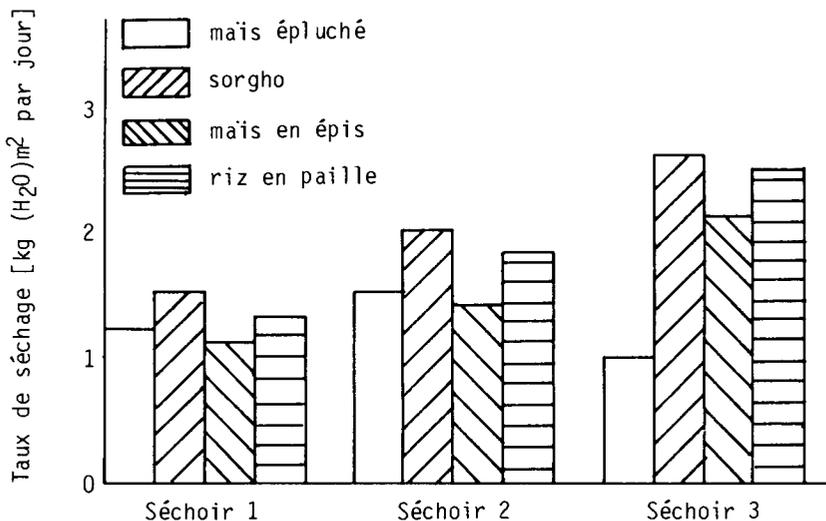


Fig. 4. Taux de séchage des trois séchoirs.

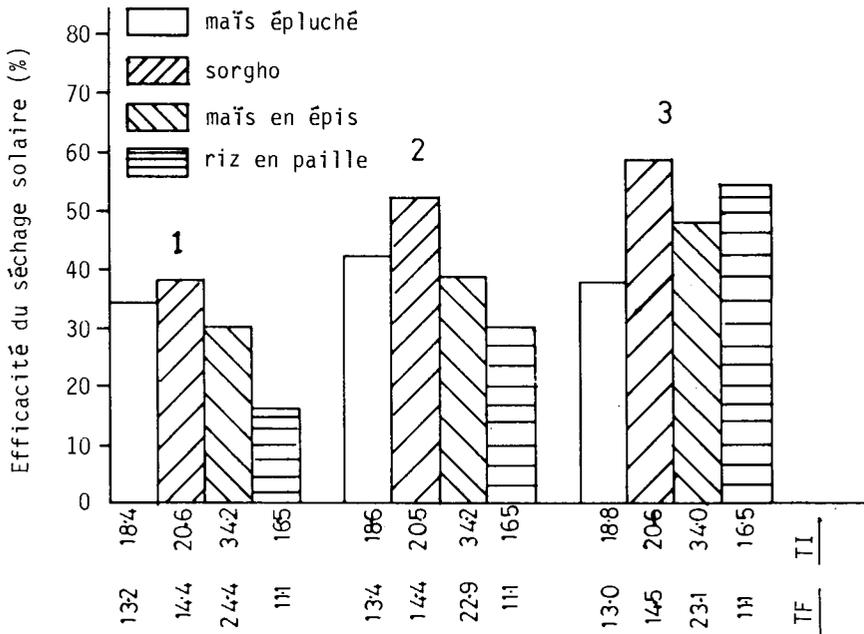


Fig. 5. Séchage solaire des trois séchoirs. TI et TF indiquent la teneur initiale et la teneur finale en eau (en % à l'état humide).

Le volume d'air qui le traversait était beaucoup moins important que celui des capteurs 2 et 3. Par conséquent, le capteur 1 peut avoir une efficacité supérieure à celle des deux autres mais son taux de séchage est moins élevé.

Les autres résultats peuvent être résumés de la façon suivante :

- Pour les trois séchoirs, le sorgho a séché plus rapidement que les autres céréales (fig. 4).
- Il n'y a pas eu de différence marquée entre les séchoirs 2 et 3 pour ce qui est du maïs épluché, mais le séchoir 3 a donné un meilleur rendement dans le cas du maïs en épis et du riz en paille (fig. 4).
- Le séchoir 3 a également séché plus rapidement le plantain (fig. 6), l'igname et l'okra.

Le taux de rendement plus élevé du séchoir 3 peut s'expliquer par une meilleure circulation de l'air réchauffé dû à l'effet de cheminée. On a constaté qu'il était possible, si l'on ne disposait pas de ventilateur, de créer un mouvement d'air important dans les grains à sécher en générant une petite différence de pression par

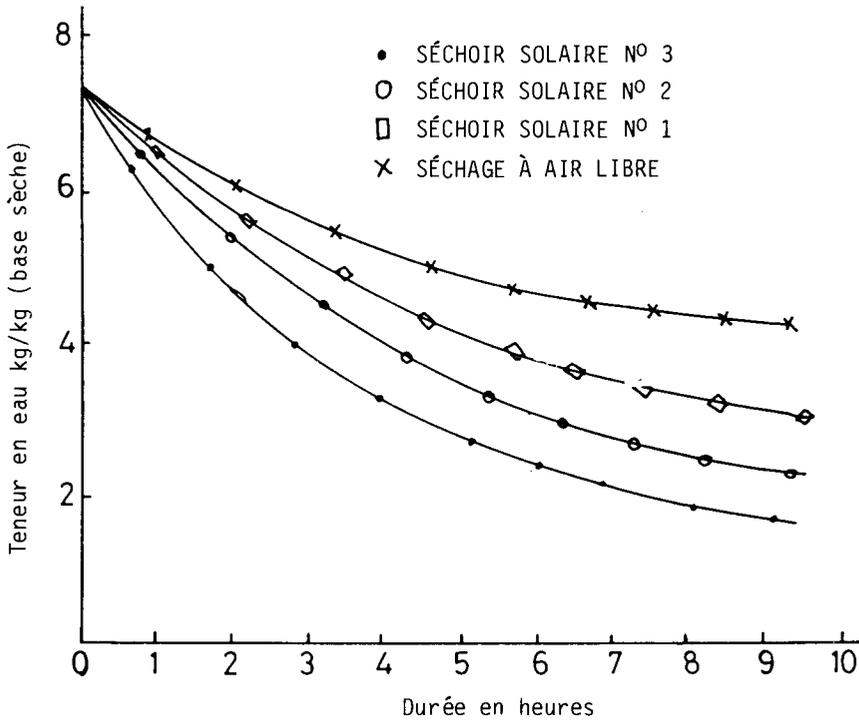


Fig. 6. Courbes de séchage du plantain.

l'effet de cheminée. Cette différence de pression pourrait s'exprimer ainsi :

$$\Delta P = \Delta \rho_{\text{air}} \times g \times H \quad [2]$$

où

$\Delta \rho_{\text{air}}$ = différence de densité de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre de séchage (kg/m^3),

g = constante de gravitation (m/s^2), et

H = distance verticale entre l'entrée d'air et la sortie d'air du séchoir (m).

On pourrait donc améliorer le rendement du séchoir 2 en y installant une cheminée. Les utilisateurs l'ont déjà proposé et la version modifiée en tient compte. Le capteur solaire à concentration du séchoir 1 n'est pas le meilleur pour le séchage mais pourrait faire très bien dans le chauffage de l'eau. Étant donné le faible volume d'air réchauffé acheminé dans le tuyau, il perd beaucoup de son effet lorsqu'il entre dans la grande chambre de distribution du séchoir.

On a pu observer et confirmer, d'après les tests sur les séchoirs solaires à céréales, qui conviennent le mieux aux agriculteurs ruraux, que les paramètres suivants influaient sur la capacité de séchage :

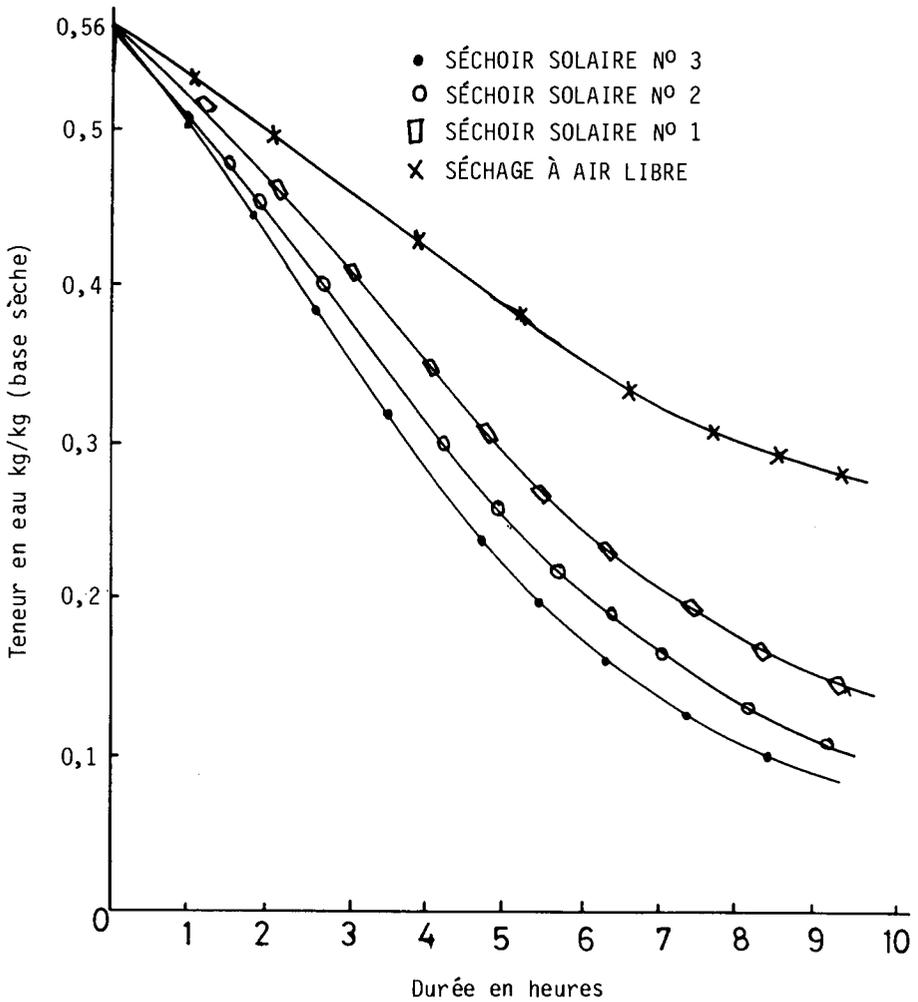


Fig. 7. Courbes de séchage du maïs.

- le rayonnement solaire;
- le type de céréale, qui influe sur la résistance à la circulation de l'air, l'absorption du rayonnement solaire et le mouvement de l'humidité;
- la teneur en eau des céréales, vu que la teneur en eau au moment de la récolte détermine la quantité d'eau à éliminer;
- la vitesse du vent;
- l'écart vertical entre la sortie d'air et l'entrée d'air du séchoir (effet de cheminée); et

- ° l'humidité relative de l'air, qui dépend du climat ou de la saison. Pendant la saison des pluies, l'air est très humide et, même lorsqu'il est réchauffé, le pouvoir d'évaporation de l'air en mouvement est encore très bas. De fait, l'air pourrait bien accroître l'humidité au lieu de la diminuer. Pendant cette période, on recommande l'emploi de matières siccatives.

Essais sur le terrain et réaction des clients

Les trois types de séchoirs solaires ont été présentés à des agriculteurs et au public lors de foires agricoles et d'expositions pendant la semaine de la technologie. Pendant ces démonstrations, on a procédé au séchage de céréales et de produits alimentaires comme du plantain, de l'igname et de l'okra. Les gens devaient choisir le séchoir qui leur convenait et en faire une analyse critique. Au total, 210 personnes ont répondu à notre demande. Parmi les questions que nous avons posées, mentionnons :

- ° Quelle taille a votre exploitation (petite, moyenne ou grande) et quel genre de culture pratiquez-vous ?
- ° Quel type de système de séchage et d'entreposage utilisez-vous à l'heure actuelle ? Si vous n'en avez pas, voulez-vous en adopter un ? Si vous en avez un, voulez-vous le changer pour un système solaire ?
- ° Si vous deviez acheter un séchoir solaire, lequel des trois choisiriez-vous ? Donnez vos raisons.
- ° Si vous ne voulez pas de séchoir solaire, donnez vos raisons.

Trois grandes conclusions peuvent être tirées à partir des réactions des agriculteurs et des autres personnes.

En premier lieu, les petits agriculteurs n'avaient pour la plupart aucun système artificiel de séchage et ils recouraient au séchage à l'air libre. Quelques agriculteurs ayant une exploitation importante ou de taille moyenne possédaient un type quelconque de système artificiel de séchage et d'entreposage.

En deuxième lieu, les agriculteurs d'exploitations de taille moyenne ont préféré le séchoir 2 ou 3 alors que ceux dans les petites exploitations ont opté pour le séchoir 3, un séchoir en vrac pouvant servir à différentes cultures, au lieu du séchoir-bac d'entreposage combiné (séchoir 2) qui ne pouvait servir qu'à un type de culture.

En troisième lieu, la plupart des agriculteurs ruraux ont fait remarquer qu'ils hésitaient à acheter un séchoir solaire à cause d'un manque de connaissances pour en assurer l'entretien et aussi à cause du coût initial minimum de 500 \$ US. Selon eux, l'exploitation et l'entretien du matériel nécessitaient une grande compétence. La majorité d'entre eux n'avaient jamais vu de séchoir solaire de près mais seulement à la télévision ou dans un journal. Cela révèle le caractère insuffisant des essais ou de la campagne de vulgarisation.

Recommandations et conclusions

Des recherches considérables ont eu lieu sur l'application de l'énergie solaire dans l'agriculture au Nigéria, plus particulièrement pour le séchage des produits alimentaires, mais les agriculteurs ruraux n'en ont pas mis à profit les résultats. La situation s'explique par un manque de coordination entre les travailleurs et les chercheurs ainsi que par une vulgarisation insuffisante des résultats auprès des agriculteurs.

On a constaté que le contexte socio-culturel des agriculteurs nigériens ne les empêchait pas d'utiliser les séchoirs solaires et qu'ils accepteraient d'emblée un modèle peu coûteux n'exigeant aucun entretien.

Nous avons donc fait six recommandations pour aider à populariser les séchoirs solaires chez les agriculteurs ruraux du Nigéria.

En premier lieu, les séchoirs solaires destinés aux agriculteurs ruraux du Nigéria doivent être très abordables, d'un entretien aisé et faciles à utiliser pour le séchage de n'importe quelle culture tropicale. À cette fin, il conviendrait d'utiliser les matériaux locaux.

En deuxième lieu, il devrait s'établir une coordination entre les chercheurs et les travailleurs au pays dans les domaines du séchage solaire. La Société de l'énergie solaire du Nigéria représente une bonne tribune à cette fin et la conférence annuelle de la Société assure déjà une certaine coordination.

En troisième lieu, à cause des différences entre les zones climatiques au Nigéria, il pourrait se révéler nécessaire de diviser le pays en zones pour les besoins de la recherche sur le séchage solaire. Le Nord a un climat sec presque à longueur d'année, mais l'humidité dans le Sud est très élevée pendant plus de quatre mois. Par conséquent, il faudrait examiner l'emploi de siccatifs dans le Sud : il y a déjà sur le marché local certaines matières siccatives, comme la cendre de bois granulaire.

En quatrième lieu, le meilleur modèle recommandé aux agriculteurs ruraux du Nigéria est le séchoir à capteur plan avec couverture transparente. La toiture, à double versant, servirait à absorber l'insolation. Selon les moyens financiers de l'acheteur, la couverture transparente du capteur pourrait être en verre, en plastique ou en polyéthylène. Pour améliorer le rendement de ce séchoir, il conviendrait d'y installer une cheminée.

En cinquième lieu, la conception de la chambre de séchage devrait permettre aux agriculteurs de l'utiliser comme un séchoir à claies ou comme un séchoir d'entreposage.

En sixième lieu, il faudrait débloquer des fonds pour étudier les répercussions de la taille des séchoirs solaires sur leur rendement. À l'heure actuelle, les études se sont limitées à des modèles de séchoir/capteur de faible capacité. En outre, il conviendrait de canaliser des fonds dans la recherche sur l'utilisation des matériaux locaux pour réduire le coût du séchoir solaire.

Bibliographie

- Adebiyi, G.A. 1982. Design, construction and testing of a solar steam unit. *Nigerian Journal of Solar Energy*, 2, 69-73.
- Araoye, A.O. 1984. Design, fabrication and testing of a solar dryer. University of Ibadan, Ibadan, Nigéria. Rapport de projet de B.Sc.
- Arinze, E.A. 1982. Instantaneous, hourly and daily prediction of incident and transmitted solar radiation on a double-layered plastic covered tiled surface. *Nigeria Journal of Solar Energy*, 2, 15-25.
- _____ 1985. Design and performance evaluations of large-scale natural convection solar crop dryer. In Proceedings of National Solar Energy Conference, Enugu. Société de l'énergie solaire du Nigéria.
- Awachie, I.R.N. 1982. Design features and test results of a solar hot box. *Nigerian Journal of Solar Energy*, 22, 74-80.
- Bamiro, O.A. 1983. Empirical relations for the determination of solar radiation in Ibadan, Nigéria. *Solar Energy*, 31(1), 85-94.
- Bamiro, O.A., Ideriah, F.J.K. 1982. Determination of the optimum collector orientation for Ibadan, Nigéria. *Nigerian Journal of Solar Energy*, 2, 26-32.
- Chendo, M.A.C., Schmitter, E.F. 1982. Observed performance of Perspex covered solar still. *Nigerian Journal of Solar Energy*, 2, 23-46.
- Doyle, M.D.C. 1982. The estimation of diffuse solar radiation. *Nigerian Journal of Solar Energy*, 2, 3-14.
- Ezeilo, C.C.O. 1979. Angular space-time relations in solar radiation. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, 3(1), 35-45.
- Ezekwe, C.I., Ezeilo, C.C.O. 1981. Measured solar radiation in a Nigerian environment compared with predicted data. *Solar Energy*, 28, 181-186.
- Ideriah, F.J.K. 1981. A model for calculating direct and diffuse solar radiation. *Solar Energy*, 26(5), 447-452.
- Ideriah, F.J.K., Bamiro, O.A. 1982. The determination of diffuse component of solar radiation in Ibadan. *Nigerian Journal of Solar Energy*, 2, 81-88.
- Igbeka, J.C. 1980. Solar energy utilization for rural agriculture (séance d'affiches). In Janzen, A.F., Swartman, R.K., ed., *Conversion à l'énergie solaire, II : Colloque international sur l'utilisation de l'énergie solaire*, London, Ontario, 10 au 24 août 1980.

- _____ 1982. Flat plate solar collector/dryer. Département de génie agricole, Université d'Ibadan, Ibadan, Nigéria. Rapport de recherche inédit. 28 p.
- Ofi, O. 1982. Construction and evaluation of a solar dryer. Nigeria Journal of Solar Energy, 2, 47-59.
- Tani, E.D. 1979. Design and development of a photovoltaic energy system as an alternative for the rural tropical habitat. Département de génie agricole, Université d'Ibadan, Ibadan, Nigéria. Rapport de projet de M.Sc.

LA TECHNOLOGIE APPROPRIÉE AU SÉCHAGE SOLAIRE DU POISSON DANS LES CENTRES DE PÊCHE ARTISANALE

Niokhor Diouf¹

Résumé — L'auteur fait une étude globale des améliorations de la chaîne technologique de fabrication artisanale des différents types de poisson séché au moyen de séchoirs solaires simples en polyéthylène et de techniques appropriées de prétraitement et de conservation après transformation. Enfin, l'étude tente de répondre à la question suivante : "Le séchoir solaire peut-il constituer un moyen de traitement économique pour les productrices et les consommateurs locaux de poisson séché?" D'autant plus que les conditions favorables au séchage naturel ont engendré une certaine absence de productivisme chez les transformatrices.

Analyse des aspects techniques et socio-économiques du secteur de traitement artisanal du poisson

Pour l'Afrique en développement, l'essor des technologies appropriées en milieu rural et urbain est une priorité. L'Institut de technologie alimentaire a bien compris cette priorité et, en collaboration avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'USAID, a cherché à adapter le séchoir solaire aux conditions locales de production du poisson séché dans les centres de pêche artisanale au Sénégal et en Gambie.

Le secteur de traitement artisanal du poisson constitue une importante activité dans les centres de pêche (tableau 1) et procure des milliers d'emplois et d'importants revenus. La transformatrice, devenue un véritable entrepreneur, utilise les services de 3 à 5 personnes, ou même plus selon les besoins, pour se ravitailler en matière première, effectuer le prétraitement du poisson frais, surveiller les opérations de séchage, conditionner et emballer les produits finis et commercialiser la production.

Les conditions de fabrication et de stockage du poisson séché sont simples et sommaires. Le travail se fait à mains nues, souvent à terre avec un matériel simple mais guère entretenu. En outre, l'insalubrité du secteur de traitement est aggravée par la pollution environnante² en plus du non-respect des conditions élémentaires d'hygiène et de propreté par les transformatrices qui utilisent une

1. Institut de technologie alimentaire, Dakar, Sénégal.

2. La pollution environnante est due notamment aux déchets de pêche ou de production qui s'amoncellent, aux larves, dermestes et nécrobies qui infestent le poisson en séchage ou séché et aux eaux usées et déchets de toutes sortes qui jonchent le sol.

Tableau 1. Tonnage du poisson transformé artisanalement au Sénégal par an.

Produits finis	Quantités obtenues (en tonnes)						
	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Poisson salé, séché ou saly	953	988	707	758	528	477	639,7
Poisson séché braisé ou kéthiakh	7 169	6 002	5 728	6 014	7 047	6 458	7 949,8
Poisson fumé ou métorah	1 387	1 381	1 027	698	680	657	560,4
Poisson fermenté séché ou guèdj	3 869	4 232	3 751	3 403	3 496	3 436	3 687,7
Poisson séché entier ou tambadiang	3 017	2 894	3 338	3 928	939	713	3 949,7
Toufa, yeet	1 632	3 580	5 200	7 403	2 803	1 567	924,6
Autres produits finis pagne, yokhoss	1 794	112	97	132	2 272	4 000	105,1
Total produits finis	19 791	19 181	19 848	22 297	17 765	16 049	17 870,4

Source : Direction d'océanographie et des pêches maritimes.

Le rendement en produits finis des poissons traités par les procédés artisanaux varie entre 30 et 60 % compte tenu de la diversité des matières premières et des procédés. En tenant compte de l'auto-consommation, la transformation artisanale traite environ 45 000 à 60 000 tonnes de poissons frais par an.

série d'insecticides, DDT ou PROPUXOR notamment, pour préserver leur production de l'infestation. Enfin, les transformatrices connaissent beaucoup de problèmes aigus au niveau de la commercialisation du poisson séché, bien que la demande au niveau local ou africain excède l'offre.

De pair avec le développement de la pêche artisanale, la transformation artisanale est passée de la production pour l'usage domestique à la production commerciale pour l'échange. Toutefois, la technologie de production du poisson séché connaît depuis 1960 une certaine stagnation, suite à l'application du décret gouvernemental interdisant le séchage naturel par terre dans les concessions au profit du séchage naturel par claies sur les plages de débarquement.

Les deux tentatives majeures d'amélioration de la production de poisson séché ont eu lieu sans succès à Saint-Louis et à MBour à 20 ans d'intervalle. D'autres tentatives infructueuses ont eu lieu pour l'implantation d'usines de séchage mécanique du poisson dans les centres de pêche riches en espèces halieutiques recherchées, à Kayar notamment, en dépit de l'usage de ressources rares (investissement, devises et énergie) dans de telles localités.

Quant à la recherche appliquée sur la technologie du poisson dans les centres de pêche, le bilan est relativement maigre, d'autant plus que tous les projets de R&D ont porté, et portent encore, sur une technique au détriment d'une étude globale des améliorations nécessaires au secteur de production de chaque type de poisson séché. Ainsi, la domination exercée par la nature sur les différentes techniques de production du poisson séché est encore prépondérante : les opérations de préparation du poisson avant séchage se font à même le sol; la chaleur solaire naturelle est utilisée pour le séchage; le sel utilisé est de fabrication artisanale par assèchement des mares salines; les claies de séchage sont construites en bois et les roseaux et les lianes de rôniers servent à l'emballage du poisson frais ou séché.

Après avoir examiné la situation actuelle de la technologie de production du poisson séché dans les centres de pêche artisanale, il devient nécessaire d'adopter une solution intégrée pour régler ces différentes carences d'ordre technique, sociale et économique. Ce grand secteur vital bénéficiera alors d'un développement harmonieux et intégral.

Matériels et méthodes

Cette étude a débuté pendant la phase d'adaptation du séchoir solaire aux conditions locales de production du poisson séché et s'est poursuivie avec l'installation d'ateliers de séchage solaire dans les centres de pêche de MBour, Joal, Kayar et Missirah.

En plus des opérations d'écaillage, d'étripage et de lavage, la préparation du poisson frais en vue du séchage à l'air libre (fig. 1) ou en enceinte solaire comporte différentes opérations en fonction de la nature du produit final : fabrication du Kéthiakh (fig 2); fabrication du guëdj (fig. 3); fabrication du saly (fig. 4) et fabrication du tambadiang (fig. 5).

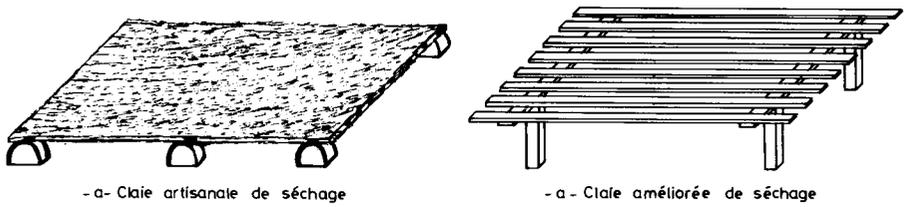
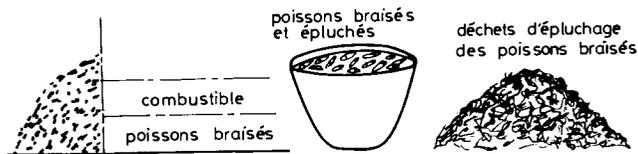
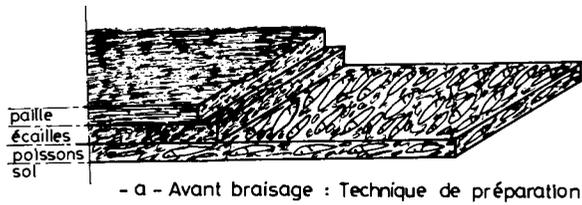
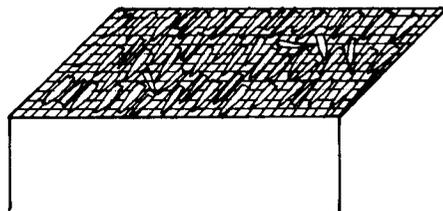


Fig. 1. Claies de séchage du poisson.



- b -Après braisage : Opération de manutention du poisson braisé



- c - Séchage naturel du poisson braisé

Fig. 2. Technique artisanale de fabrication du kēthiakh (poisson braisé séché).

Chaque atelier de séchage solaire (fig. 6) dispose de l'équipement adéquat permettant de produire ces quatre types de poisson séché. Le séchage du poisson pré-traité se fait de deux

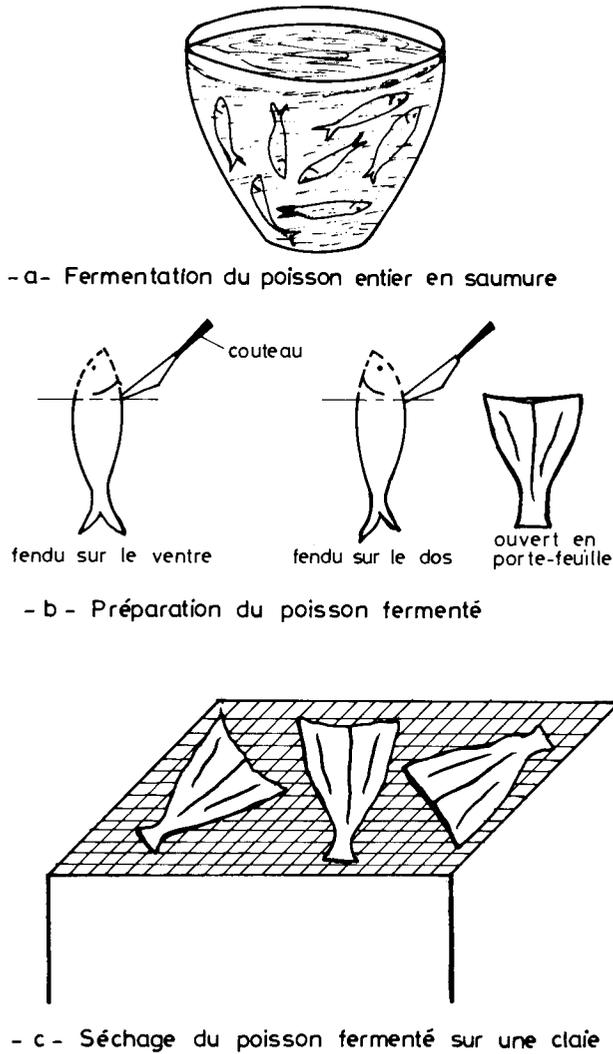


Fig. 3. Technique de production du guêdj (poisson fermenté séché).

façons : le séchage statique sur les claies artisanales ou améliorées (fig. 1) et dans les séchoirs solaires de type Brace Institute (fig. 7) ou de type case (fig. 8); ou le séchage par suspension dans le séchoir dôme (fig. 9).

Fonctionnement des séchoirs solaires à polyéthylène

Ces trois séchoirs solaires à polyéthylène sont des systèmes à chauffage direct où seule l'énergie solaire est utilisée et le poisson à sécher joue le rôle d'absorbeur. La charpente est métallique pour

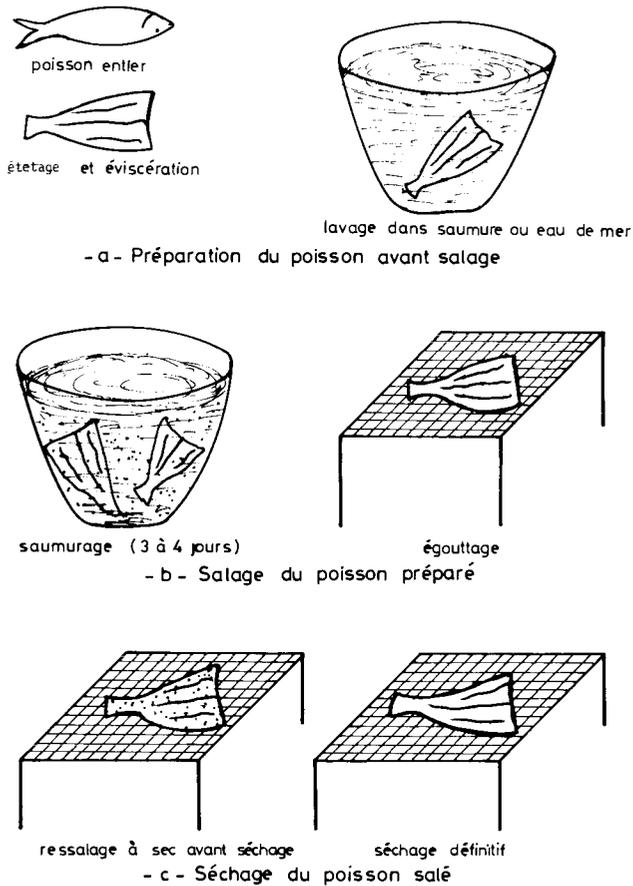


Fig. 4. Technique artisanale de production du saly (poisson salé séché).

le séchoir à dôme ou en bois pour les deux autres prototypes. Les faces claires (polyéthylène transparent de 180 microns) de l'enceinte transmettent la radiation solaire et les faces noires (polyéthylène noir de 300 à 350 microns) l'absorbent. Des événements aménagés en bas et en haut de l'installation assurent la circulation de l'air de séchage. Une porte d'accès est aménagée pour l'entrée et la sortie des transformatrices. Quant à l'emplacement du séchoir solaire, l'installation doit être bien exposée au soleil pendant toute la journée et les ouvertures des trous d'aération inférieurs doivent être orientés du côté des vents dominants.

La radiation solaire pénètre dans l'installation à travers les surfaces de transmission. Ensuite, elle est absorbée sous forme de chaleur par les surfaces internes noires. Celles-ci réémettent à leur

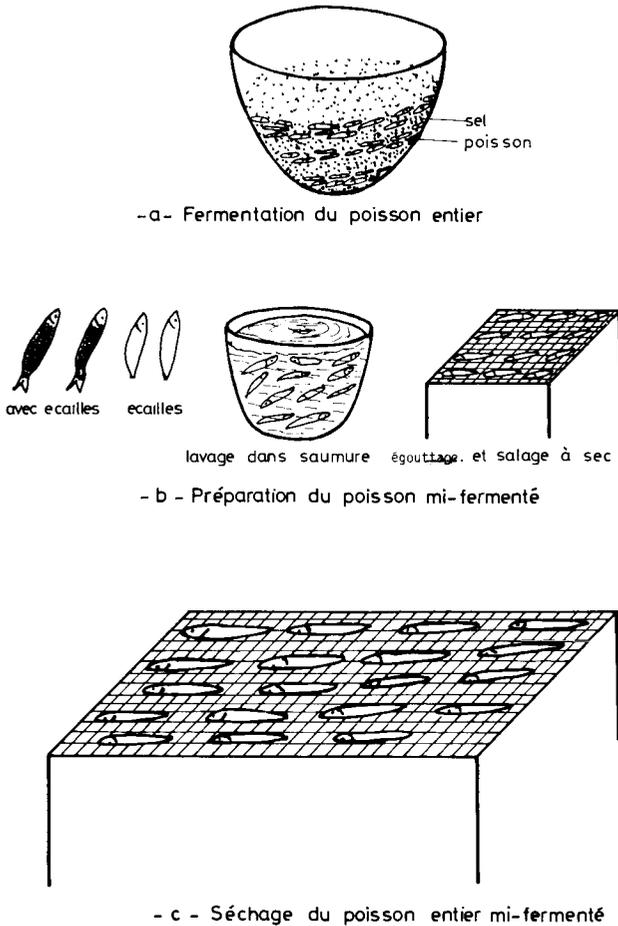


Fig. 5. Technique artisanale de production du tambadiang (poisson séché entier).

tour un rayonnement surtout infra-rouge dont une bonne composante n'arrive plus à traverser le film transparent. Donc, il se produit ainsi un piégeage de calories par effet de serre. Cette chaleur est transmise à l'air par conduction, rayonnement et principalement par convection. L'air réchauffé se dilate dans l'enceinte de séchage, se charge de l'humidité du produit entreposé et s'échappe vers l'orifice de sortie. Le trou d'aération inférieur permet la dilatation de l'air de séchage à mesure qu'il s'échappe en montant ou en sortant du séchoir.

Pour le séchage du poisson sur claies, celles-ci couvrent pratiquement toute la zone du plancher, à l'exception de l'allée de circulation des transformatrices. En outre, ces claies sont à

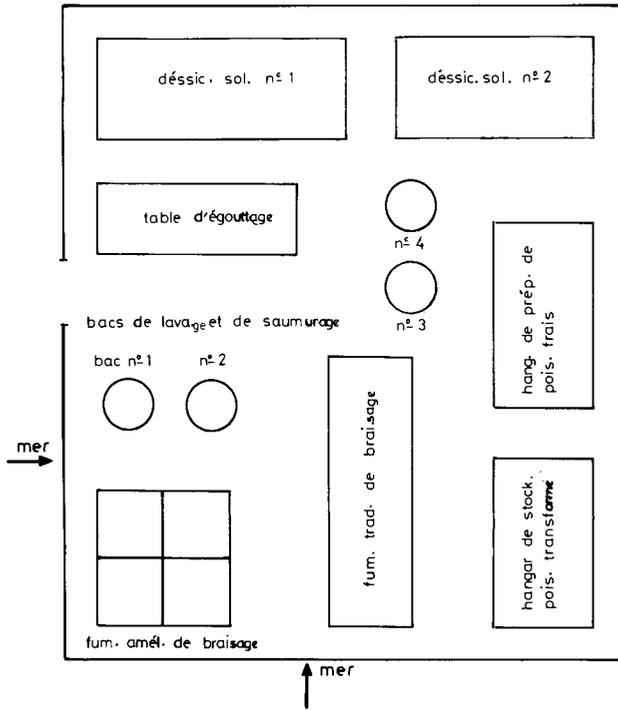


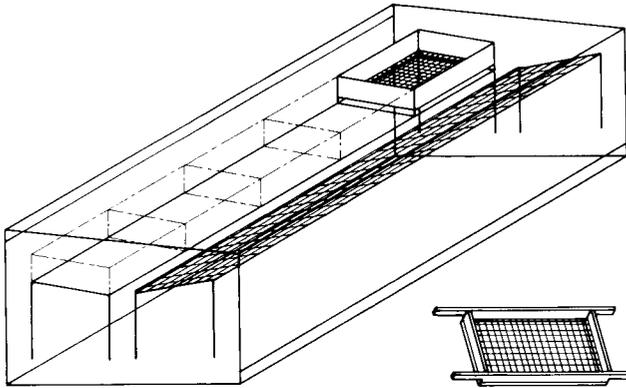
Fig. 6. Modèle d'atelier de séchage solaire à l'Institut de technologie alimentaire, Sénégal.

claire-voie pour permettre le passage de l'air de séchage. Le produit à sécher est réparti uniformément en laissant de petits espaces réguliers pour qu'il soit retourné périodiquement, contrôlant ainsi le degré de séchage.

Les trappes d'aération sont fermées la nuit, ou en cas de pluie, pour éviter toute réhumidification importante du produit.

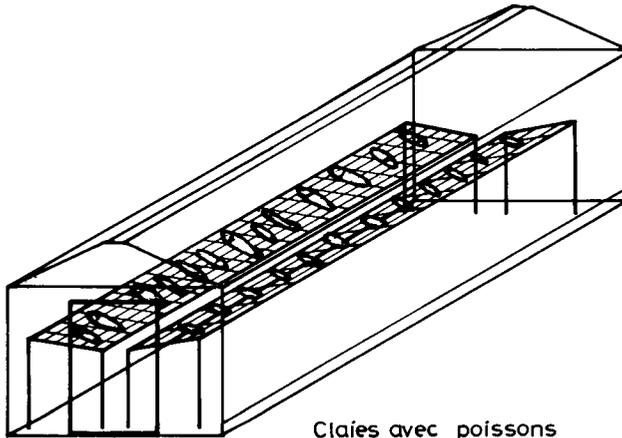
Le séchage

Pour suivre la cinétique du séchage et les modifications de la qualité du poisson en cours de prétraitement et de séchage naturel et solaire, nous avons étudié les caractéristiques physiques de l'air de séchage à l'aide de téléthermomètres "ULTRAKURST" pour les mesures de température, d'hygromètres "RICHARD" pour les mesures d'humidité relative et d'anémomètres pour la mesure de la vitesse de circulation; l'activité de l'eau à l'aide de l'appareil Aw-Value Analyzer Model 5803; et les pertes de poids du produit en production; et l'évolution de la qualité chimique, microbiologique et organoleptique du produit à sécher ou fini.



Claie de séchage proposée

Fig. 7. Claies de séchage à l'intérieur d'un séchoir solaire de type Brace (longueur : 7 m; largeur : 3,5 m; hauteur minimale : 1,80 m; hauteur maximale : 2,10 m).



Claies avec poissons

Fig. 8. Séchoir solaire de type case (longueur : 7 m; largeur : 3,5 m; hauteur minimale : 2 m; hauteur maximale : 2,7 m).

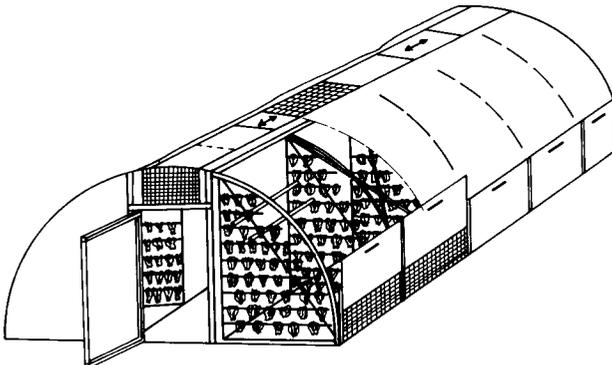


Fig. 9. Séchoir solaire à dôme avec poissons accrochés.

Résultats et discussions

Conditions de préparation du poisson avant séchage

Le braisage des espèces pélagiques (sardinelle et ethmalose) au four parpaing (80 à 90 x 10² kcal par kg de poissons) est entre autre plus hygiénique et réduit considérablement la propagation de fumée dans le milieu environnant. En outre, l'abaissement de la teneur en humidité du poisson frais passe de 5 à 10 % au cours du braisage par terre et de 9 à 18 % au cours du braisage par four; ce qui correspond à une baisse de l'activité d'eau de 0,99-0,98 à 0,92-0,90 pour le poisson braisé à terre et 0,86-0,82 pour le poisson braisé au four. Enfin, notons que le poisson braisé est cuit quel que soit le mode de braisage.

La fermentation du poisson entier ou éviscéré avec viscères en saumure légère (6 à 12 degrés Baumé) dans des bacs permet d'obtenir dans de meilleures conditions hygiéniques un produit fermenté au goût, à l'aspect et à l'arôme recherché par les transformatrices. Par ailleurs la flore lactique de fermentation se développe rapidement pour atteindre le palier de stabilité 10⁵ à 10⁶ contrairement à une chute notable de la flore microbienne de putréfaction. Signalons que c'est le *Lactobacillus plantarum* qui joue un rôle prépondérant tant sur la qualité que la quantité dans le processus de fermentation du guédj.

La déshydratation du poisson frais en salage à sec est plus rapide qu'en saumure. Par exemple, l'activité de l'eau du capitaine salé à sec atteint environ 0,85 au bout de 48 heures contre 0,90 pour le capitaine salé en saumure. Toutefois, les transformatrices combinent le salage à sec et le saumurage compte tenu de la configuration des bacs de salage qui ne permettent pas l'évacuation simultanée de l'eau d'exsudation du poisson. Quant à l'altération du poisson salé, on peut y remédier avec les précautions suivantes : éviter le parage du poisson frais à terre avant salage afin d'éliminer les possibilités d'altération du poisson salé par les moisissures; utiliser du sel exempt de bactéries halophiles pour le salage par un stockage préalable du sel marin après fabrication pendant 6 à 7 mois avant emploi.

La phase de préparation du poisson frais avant le séchage proprement dit est importante, elle permet, entre autres, d'abrèger la phase de mise en température. En outre, le couplage du séchage aux techniques de prétraitement comme le salage ou le braisage permet d'accroître le rendement de l'opération de séchage et l'obtention de produits répondant aux goûts particuliers des consommateurs.

Caractéristiques physiques de l'air de séchage

L'examen du diagramme établi entre février et juin à MBour et Joal montre que la température à l'intérieur des séchoirs varie dans la journée entre un maximum de 53°C et un minimum de 28°C (fig. 10) pendant les heures d'ensoleillement, avec un palier de 49 à 53°C entre 12 et 16 h; l'humidité relative à l'intérieur des séchoirs varie entre 84 et 33 %, avec un palier de 33 à 38 % entre 12 et 16 h; la température ambiante varie entre un maximum de 37°C et un minimum de 28°C sans palier et l'humidité relative atmosphérique varie entre un maximum de 84 % et un minimum de 55 % sans palier. En outre, la

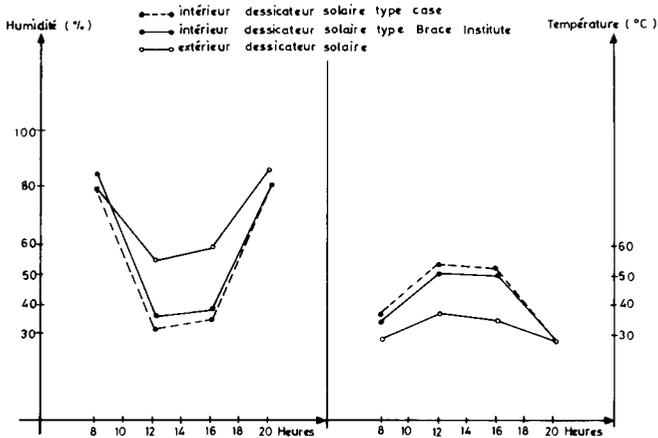


Fig. 10. Diagramme d'humidité relative et de température à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir solaire.

circulation de l'air de séchage dans le séchoir, par phénomène de convection naturelle, est appréciable et représente environ 25 % de la vitesse de l'air ambiant (tableau 2).

Quant à la moyenne d'insolation journalière globale mesurée au solarimètre muni d'un intégrateur (Lintronic Ltd., 54-59 Bartholomew Close, London UK), elle avoisinait 15 MJm^{-2} .

Ces différentes conditions de température, d'humidité relative et de circulation de l'air de séchage dans le séchoir solaire offrent les avantages non négligeables suivants : réduction notable des variations climatiques sur les poissons en séchage naturel (contamination par la poussière atmosphérique intense en saison sèche dans nos pays sahéliens, l'humidité nocturne et la pluie) avec la fermeture du séchoir et élimination des pertes dues à l'infestation intense (en période d'hivernage notamment) du poisson en séchage par les larves et les dermestes que l'on observe sur les claies artisanales, ce qui différencie à vue d'oeil le séchage artisanal (présence de myriades de larves et de dermestes) du séchage solaire.

Malgré ces avantages certains, le séchoir solaire reste dépendant des variations fréquentes des caractéristiques de l'air atmosphérique et de l'intensité solaire, d'où la question suivante : Comment libérer le séchoir solaire des conditions atmosphériques à l'instar de la pompe à chaleur ?

Caractéristiques différentielles du poisson séché artisanalement et du poisson séché sous séchoir solaire

Le séchage du poisson braisé

La figure 11 et le tableau 3 ont été interprétés à la lumière du diagramme d'humidité relative et de température pendant la journée à

Tableau 2. Mesure de la vitesse de l'air de séchage.

Heures	Vitesse du vent ambiant Vm/s	Vitesse de l'air à l'entrée dans le séchoir V _{1m/s}	Vitesse de l'air à la sortie du séchoir V _{2m/s}
8 h	3,90	3,05	0,90
12 h	3,20	2,88	0,80
16 h	4,54	3,90	1,20
18 h	3,80	2,87	0,86

l'intérieur et à l'extérieur du séchoir solaire. La phase de mise en température et le préséchage du poisson sont effectués partiellement ou entièrement durant l'opération de braisage selon l'intensité du feu de flambage. Ainsi la phase d'évacuation de l'eau de surface du poisson braisé se termine environ au bout des 4 à 5 premières heures d'exposition dans le séchoir. La phase de séchage solaire accéléré du poisson braisé dure environ 30 heures (c'est-à-dire 18 heures de séchage effectif) au bout desquelles le kēthiakh présente un teneur en eau inférieure à 28 % contre plus de 32 % d'humidité pour le poisson braisé et séché par claies pendant plus de 45 heures environ. Quant à l'interruption du séchage du poisson braisé au cours de la nuit, celle-ci est bénéfique pour le processus de séchage du produit qui voit son eau résiduelle migrer de l'intérieur du poisson à la surface. Cela explique l'accentuation du processus de séchage du poisson braisé au cours des premières heures de la matinée. Mais ce phénomène se complique pour le poisson braisé et séché sur claies à cause de l'importance des condensations nocturnes. Le poisson braisé au four sèche plus rapidement sans sel au séchoir (environ 14 heures de séchage solaire effectif) que le poisson braisé par terre (environ 18 heures de séchage solaire effectif) et salé légèrement. Les températures atteintes dans le séchoir solaire n'altèrent ni la couleur ni la saveur du kēthiakh obtenu. En outre, le produit obtenu est de chair plus consistante, de goût très apprécié et présente un meilleur aspect et une absence presque totale de l'odeur du kēthiakh séché artisanalement.

Le séchage solaire du poisson fermenté

La figure 11 et le tableau 3 ont été interprétés à la lumière du diagramme d'humidité relative et de température pendant la journée à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir. Un préséchage solaire du poisson fermenté et paré de 4 à 5 heures avec ouverture de la porte d'accès est nécessaire pour éviter la formation d'une croûte à la surface du produit. Les conditions adéquates qui empêchent la formation d'une croûte à la surface du poisson fermenté sont les suivantes : températures de séchage inférieures à 42°C et vitesse de circulation de l'air de séchage supérieure à 1 m/s.

La phase d'évacuation de l'eau de surface du poisson fermenté dure environ 8 heures, ce qui coïncide généralement avec la fin de la première journée de séchage solaire où les teneurs en eau du poisson fermenté mi-séché varient entre 46 et 56 %. Au cours de la nuit suivante, l'eau migre de l'intérieur du produit à la surface, et ce

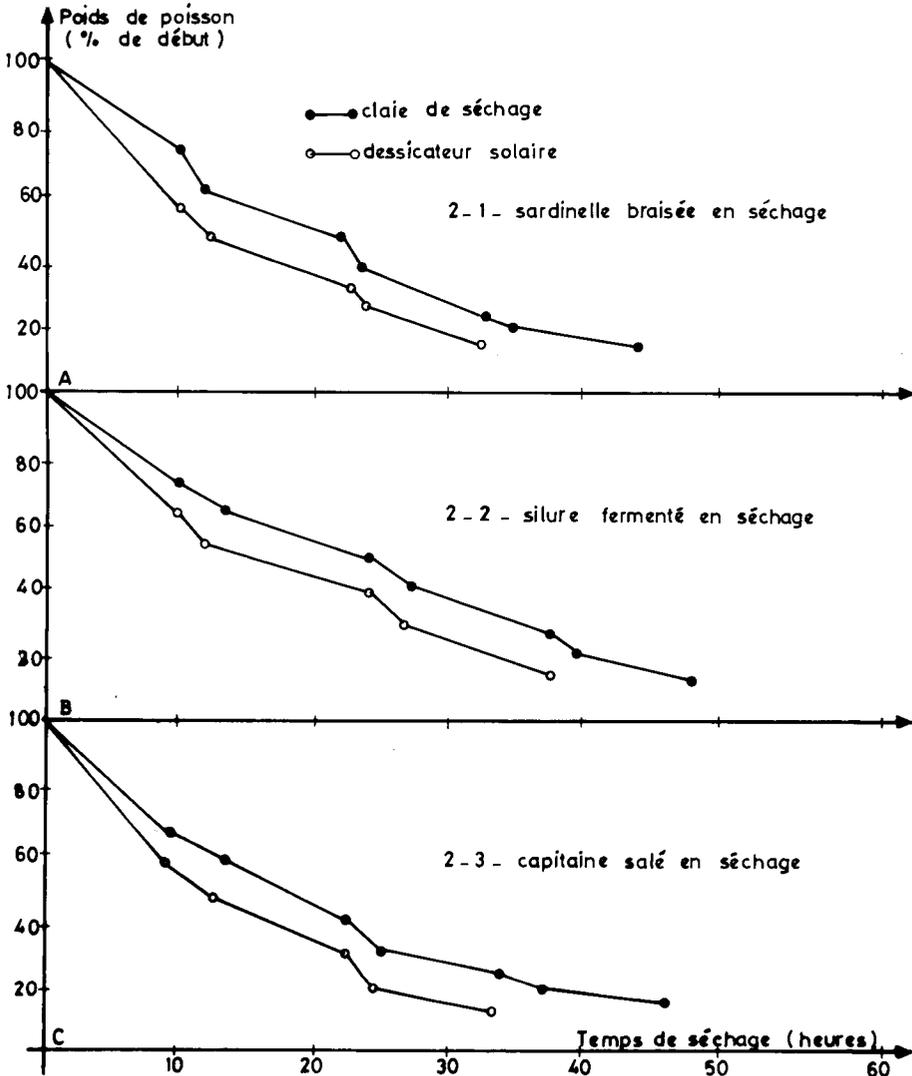


Fig. 11. Courbes de séchage du poisson braisé, fermenté et salé.

phénomène se déroule plus rapidement si l'influence du processus de condensation nocturne sur le produit est nulle ou faible dans le séchoir. Ainsi en éparpillant sur la dalle du séchoir du sel fin, le phénomène de condensation nocturne et de réhumidification est presque nul sur le produit et le lendemain, la couche du produit en séchage est humidifiée grandement par le phénomène de migration de l'eau de l'intérieur du poisson à la surface.

La phase de séchage solaire accéléré dure environ 10 à 20 heures, selon la nature et l'épaisseur du poisson fermenté. Le phénomène de migration de l'eau résiduelle de l'intérieur à la surface du produit

Tableau 3. Évolution de la qualité du poisson pendant la production du kéthiakh et guédg (séchage solaire).

Produit	Protéines (%)	ABVT ¹ (mg/100 g)	pH	Humidité (%)	Activité de l'eau	Flore aérobie	Flore putride	Flore lactique	Flore halophile
<u>Kéthiakh</u>									
Poisson frais	21,9	24	5,95	65,7	0,99	1 x 10 ⁵	<10	--	--
Poisson braisé	29,6	26	6,05	58,0	0,89	3 x 10 ⁴	<10	<10	<10
Poisson braisé séché	62,0	27	6,20	24,0	0,70	4 x 10 ³	<10	<100	<100
<u>Guédg</u>									
Poisson frais	18	35	6,30	72	0,98	6 x 10 ⁵	10 ²	<10	--
Poisson fermenté	23	60	6,70	68	0,94	5 x 10 ⁶	<10	10 ⁵	10 ²
Poisson fermenté séché	59	58	6,72	28	0,75	4 x 10 ⁵	<10	10 ³	10 ³

1. Taux d'azote basique total.

permet d'accélérer le séchage durant les premières heures de la matinée. Cela accélère aussi le processus de fermentation du produit qui voit sa flore bactérienne et lactique croître vers le palier de stabilité 10^5 à 10^6 chaque nuit.

Les températures de séchage accéléré du poisson fermenté ne doivent pas dépasser 50°C pour éviter l'altération de la couleur et de la saveur du produit final.

Quant au mode de séchage du poisson fermenté, notons que le poisson fermenté est impossible à sécher par suspension dans le séchoir dôme. En effet, le poisson fermenté et séché par suspension tombe généralement sur la dalle avant la fin du séchage, ce qui amoindrit l'aspect du produit fini.

Enfin, le poisson fermenté et séché au séchoir solaire (27 à 30 % d'humidité après 32 à 38 heures) a été bien apprécié et présente un bon aspect, une belle couleur et un bon goût bien qu'étant moins acide que le guédj obtenu par séchage naturel.

Le séchage solaire du poisson salé

L'étude du séchage solaire du poisson salé se poursuit. Les résultats obtenus permettent néanmoins de dire que le séchoir solaire accélère le processus de séchage sans recours aux sources conventionnelles d'énergie; règle le problème de l'infestation du poisson en séchage ou le produit séché par les insectes; aide à fabriquer un produit fini de meilleures qualités chimiques, microbiologiques et organoleptiques.

Les limites du séchoir solaire en polyéthylène existent et peuvent se résumer ainsi :

- le séchoir solaire est asservi aux conditions atmosphériques environnantes, bien que le produit soit directement protégé des effets négatifs de la nature, contrairement à la claie artisanale;
- le coût de construction du séchoir est élevé comparativement au coût d'une claie artisanale de séchage;
- le polyéthylène transparent se déchire facilement et doit être remplacé après chaque année d'exploitation;
- la capacité de traitement est insuffisante selon les transformatrices si le séchoir comporte une seule couche de séchage au niveau des claies.

Toutefois, nos investigations sur l'amélioration des qualités techniques du séchoir solaire à polyéthylène se poursuivent. Ainsi, pour augmenter les capacités de séchage, il faut augmenter les dimensions de la porte d'accès, permettant ainsi l'usage de claies de séchage (fig. 7, claie proposée) pouvant être remplies de poissons depuis l'extérieur et superposées en une pile de 5 à 7.

Caractéristiques générales d'exploitation des ateliers de séchage solaire

Le groupe des transformatrices a rapidement assimilé les innovations technologiques de production du poisson séché dans l'atelier (annexe 1). Ainsi, elles sont parvenues à produire tous les types de poissons séchés au Sénégal selon la disponibilité de la matière première et la demande des clients, malgré leur spécialisation antérieure en un seul produit.

L'usage des structures de prétraitement et de séchage solaire de l'atelier s'est traduit par une rationalisation de la technologie de production des différents types de poissons séchés. La production de poisson séché s'est traduite entre autres par une économie du temps de séchage (1 à 2 jours en moyenne selon la taille des espèces et les besoins des clients) et du combustible de braisage.

Quel que soit le type de poisson séché, les dépenses totales de production couvrent l'achat de matières premières (environ 65 à 82 % des sommes dépensées) et les frais généraux. La valeur des matières premières et des frais généraux varient selon les types de poisson séché et les centres de pêche. Les prix d'acquisition de la matière première peuvent doubler selon les fluctuations du marché, conformément à la loi de l'offre et de la demande (tableau 4).

Il existe trois circuits d'écoulement de la production de l'atelier :

- vente directe du produit aux mareyeurs (intermédiaires entre les transformatrices et les consommateurs) qui, disposant de ressources financières importantes, imposent les prix d'achat aux transformatrices;
- vente du produit dans les centres importants de commercialisation du poisson séché; le groupe de transformatrices loue un véhicule pour s'y rendre avec la marchandise et
- vente du produit aux exportateurs de poisson séché selon un prix négocié lors de la signature du contrat mis au point avant production.

Les deux dernières formes de commercialisation de la production sont privilégiées par les transformatrices, qui gagnent des profits substantiels contrairement à la première forme où elles peuvent faire des bénéfices ou des pertes selon les lois classiques de l'offre et de la demande.

Perspectives et recommandations

Après quelques mois de fonctionnement des ateliers, les acquis sont nombreux et variés. Il subsiste quand même des problèmes, d'où la nécessité des recommandations suivantes :

- augmenter les capacités de séchage de chaque séchoir en introduisant le séchage du poisson prétraité en piles de 5 à 7 claies de séchage superposées (fig. 7);

- ° parfaire les conditions d'approvisionnement en matière première des transformatrices (plus précisément doter l'atelier de contenants isothermiques de conservation du poisson frais sur glace), l'essentiel est de régulariser la production de l'atelier en disposant journalièrement de la quantité minimale de matière première;

Tableau 4. Analyse des coûts de production du kēthiakh dans l'atelier de Joal (1 semaine de production).

	Coût (F CFA)	Coût de production (%)
Coûts de production		
Matière première (4 paniers de poisson)	55 000	80,41
Produits nécessaires à la production		
Bois	4 500	
Sel	1 100	
Total	5 600	8,19
Coût de la main-d'oeuvre		
Livraison du poisson frais en charrette	4 000	
Chargeur pour les fours	1 300	
Décorticage des poissons braisés	2 000	
Frais d'allumage	500	
Total	7 800	11,40
Coût total de production	68 400	
Chiffre d'affaires à Joal¹		
Ventes totales ²	124 200	
Profit	55 800	
Chiffre d'affaires dans les centres¹ de commercialisation		
Frais de location d'un véhicule	27 800	
Frais d'emballage et de vente	28 000	
Total des frais	55 800	
Ventes totales ²	224 200	
Profit	100 000	

1. Poids de kēthiakh = 1 180 kg.

2. Le kg de kēthiakh fabriqué par braisage par terre coûtait entre 40 et 70 F CFA/kg à Joal au moment où le kēthiakh fabriqué par braisage au four coûtait 90 à 130 F CFA/kg. Enfin le kēthiakh est vendu à 190 F CFA le kg dans la plupart des grands centres de commercialisation.

- parfaire l'organisation de la production et de la commercialisation des produits en insistant par un encadrement technique sur les aspects suivants : esprit de travail en groupe ; initiation aux actions coopératives; initiation aux structures de crédit ; et gestion des affaires et commercialisation;
- améliorer l'hygiène de production en entreprenant les actions suivantes : poser un dallage dans la cour intérieure pour supprimer toute possibilité de reproduction des insectes ravageurs; valoriser les déchets et sous-produits de traitement; utiliser de l'eau de manutention plus propre et éclairer l'atelier au moyen de lampes à gaz afin de permettre aux transformatrices de travailler les arrivages nocturnes de poisson frais dans de bonnes conditions et en toute sécurité;
- améliorer les conditions de stockage du poisson séché avant commercialisation afin de limiter au minimum les pertes qualitatives et quantitatives de produit par insectisation et réhumidification nocturne notamment;
- poursuivre l'étude de la chaîne technologique de production de chaque type de poisson séché, notamment le processus de fermentation du poisson, le couplage salage, séchage;
- poursuivre l'étude des capacités d'innovation et d'investissement des transformatrices en approfondissant l'étude des possibilités de subvention ou de mise en place de systèmes de crédit aux transformatrices.

Conclusion

L'opération d'implantation et d'exploitation d'ateliers de séchage solaire par des technologues halieutes et des transformatrices d'expérience représente un progrès dans les actions de recherche appliquée sur la technologie artisanale du poisson au Sénégal. La collaboration entre technologues et transformatrices a servi d'exemple et l'écho suscité par l'exécution de l'opération au sein des transformatrices en est le meilleur témoin. Les transformatrices ont grandement contribué à mieux adapter ces innovations technologiques aux conditions locales des centres de pêche. Ainsi ces ateliers ont permis d'introduire au sein de la corporation des transformatrices le travail en groupe, malgré le caractère d'individualisme dominant dans le secteur; de produire un poisson séché de bonne qualité dans de bonnes conditions d'hygiène; d'entamer une étude de rationalisation de la chaîne de production artisanale du poisson séché et d'identifier les autres problèmes techniques et socio-économiques à résoudre comme mesures d'accompagnement de l'opération d'introduction de séchoirs solaires dans les centres de pêche.

L'essentiel est de poursuivre les travaux d'amélioration du séchage solaire du poisson. Une collaboration étroite entre scientifiques et transformatrices ne sera que bénéfique, car les transformatrices font preuve de capacités certaines de création et d'initiative pouvant aider à la mise au point d'une technologie de séchage solaire plus efficace et peu coûteuse.

Bibliographie

- Diouf, N. 1986. Les techniques artisanales et modernes de préparation du poisson séché et fumé. Séminaire de perfectionnement FAO/DANIDA en technologie et contrôle de qualité du poisson. 2 juin au 4 juillet 1986. ITA, Dakar, Sénégal.
- Diouf, N. et al. 1983. Le séchage solaire du poisson. Rapport technique n° 3 année 1982. Institut de technologie alimentaire (ITA). Dakar, Sénégal.
- Diouf, N. et al. 1984. Construction et exploitation de quatre ateliers de séchage solaire à MBour, Joal, Missirah et Kayar : Bilan (juillet 1983 - 31 mai 1984) et perspectives. ITA, Dakar, Sénégal.
- Diouf, N. et Sarr, M. 1982. Le séchage solaire du poisson : consultation FAO d'experts sur la technologie du poisson en Afrique, Casablanca, Maroc.
- Durand, M.M. et Conway, J. 1982. La transformation artisanale, son rôle dans l'écoulement des produits de la mer au Sénégal. Consultation d'experts FAO sur la technologie du poisson en Afrique, Casablanca, Maroc.
- Sainclivier, M. 1985. L'industrie alimentaire halieutique. 2^e volume des techniques ancestrales à leurs réalisations contemporaines. Sciences Agronomiques, Université de Rennes, France.

Annexe 1 : Conditions d'exploitation des ateliers de séchage solaire

Organisation des travaux d'exploitation de l'atelier

Un groupe de six transformatrices exploitent l'atelier avec l'encadrement d'un technologue halieute de l'ITA. Le travail consiste essentiellement à acheter les matières premières, à les prétraiter et les sécher et à la vente de produit fini. Les transformatrices recouvrent 80 % des recettes de vente du produit fini. Les frais d'entretien et d'exploitation (tableau 5) de l'atelier représentent 20 % des recettes.

Tableau 5. Coût de réalisation de l'atelier et calcul de l'amortissement mensuel.

Équipement	Coût total (F CFA)	Durée de vie (ans)	Amortissement mensuel (F CFA)
Séchoirs solaires (claies, cadre, dallage)	280 000	4	5 834
Fours de braisage	76 000	4	1 584
Cuves de fermentation, salage, lavage	40 000	4	834
Abri de manutention	40 000	3	1 112
Abri de stockage	40 000	3	1 112
Clôture	26 000	3	695
Plastique et polyéthylène clair	60 000	1,25	4 000
Petit équipement (couteaux, bassines, lampes)	24 000	1	2 000
Total			17 171

Capacités de traitement de l'atelier : 500 kg de poisson frais par cuve de fermentation, lavage et salage; 600 à 750 kg de sardinelles et d'ethmaloses par four de braisage; 600 à 750 kg de silures et de capitaines par four de braisage. Capacité de séchage solaire atelier : 1 tonne/2 jours avec claies à une seule surface de séchage et 2 tonnes/2 jours en moyenne avec claies à double étage.

Durée de séchage du poisson prétraité : 1 à 2 jours selon les transformatrices et les besoins majeurs.

LE SÉCHAGE SOLAIRE AU CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES
AGRONOMIQUES DE BAMBEY : SYNTHÈSES DES RÉSULTATS
DE QUELQUES ESSAIS

Hyacinthe Modou Mbengue¹

Résumé — Au Sénégal, le séchage des céréales se fait en grande partie au champ pour presque toute la récolte, sauf pour une faible partie qui est destinée à l'autoconsommation immédiate. Ainsi le séchage au champ se fait sur épis suivant diverses méthodes. Dans certains cas, lors de la récolte, les plantes entières sont coupées et séchées au soleil, à même le sol. Dans d'autres cas, les épis sont coupés et empilés en vrac ou liés en bottes d'environ 10 kg, formant ainsi de gros tas de séchage sur le sol. Dans ces conditions, il est facile d'imaginer que les grains, exposés pendant les 5 ou 6 semaines que dure le séchage, sont l'objet d'attaques de rongeurs, d'insectes et d'oiseaux, même si les tas de séchage sont parfois entourés de branches épineuses. Le but de cette étude consistait donc à tester de nouveaux prototypes de séchoirs susceptibles d'améliorer le séchage des céréales, du mil souna en particulier. Il s'agissait d'un crib-séchoir utilisant les courants d'air naturels de convection, et de quatre prototypes de séchoir utilisant des collecteurs solaires. Le crib-séchoir présente un intérêt certain car il permet de réaliser à la fois le séchage et le stockage de façon beaucoup plus efficace que les méthodes traditionnelles utilisées par les paysans. Il faudrait cependant réaliser une réduction des pertes de l'ordre de 14,3 % pour justifier l'achat d'un tel séchoir, en ne tenant compte que de cet avantage. Les avantages secondaires comme la libération des parcelles et le regroupement de la récolte pour le battage mécanique apparaissent moins tangibles aux yeux du paysan. Quatre types de séchoirs à ossature métallique ont été fabriqués aux ateliers du Centre national de recherches agronomiques de Bambey (CNRA) et testés en station pour connaître leur efficacité relative. Les quatre prototypes se différencient par le type de recouvrement de leur face supérieure (vitre ou tôle) et par la présence ou non d'une cheminée. Les cheminées, de forme semi-parabolique, ont été ajoutées à la structure afin d'activer l'écoulement de l'air chaud vers le haut. Des thermocouples installés en plusieurs endroits du séchoir permettent de suivre l'évolution de la température intérieure; parallèlement, la direction du vent, la vitesse de l'air à l'entrée du séchoir, la température de l'air extérieur et la température humide de l'air extérieur ont été relevées afin de voir quels étaient leurs effets sur la température de l'air à l'intérieur du séchoir et sur le

1. Centre national de recherches agronomiques de Bambey, Sénégal.

séchage du produit. Pour chaque séchoir, les relevés se faisaient sur une période d'au moins 4 jours, avec 3 ou 6 lectures par jour. Les résultats montrent que la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du séchoir dépassait rarement 10°C. Cela vient du fait qu'il n'y a pas eu en réalité de capteur solaire alimentant en air chaud le séchoir; la température à l'intérieur du séchoir n'est donc pratiquement pas plus élevée que la température ambiante du soleil. Afin de déterminer s'il y avait des différences significatives entre les quatre types de séchoirs ainsi que l'effet de la vitesse du vent, de la température extérieure et de l'heure de la journée, un modèle de régression linéaire multiple a été bâti autour de la variable dépendante qui est la température à l'intérieur du séchoir. Cette étude sur les séchoirs solaires est donc à repenser globalement car une augmentation de température de seulement 10°C est vraiment trop faible par rapport aux fortes périodes d'ensoleillement connues au Sénégal. En fait, le séchoir est dépourvu de capteur solaire performant, ce qui a pour effet de réduire son efficacité de séchage à presque celui d'un crib-séchoir. C'est la raison pour laquelle la présence de cheminée n'a pas été trouvée significative alors qu'une cheminée devrait permettre d'activer l'écoulement de l'air chaud, donc de produire un meilleur séchage si le séchoir solaire est bien conçu. De plus, le fait que la présence de vitre ne soit pas significative est assez surprenant. En effet, lorsque le capteur est bien conçu, les capteurs à plaque recouverte ont une efficacité supérieure à celle des capteurs à plaque nue.

Domaine de l'étude

Les principales cultures vivrières et cultures de rente pratiquées au Sénégal sont le mil, le sorgho, le maïs, le riz, le niébé, l'arachide et le coton. Les cultures maraîchères occupent un rang non négligeable dans la zone des Niayes et autour des grandes villes. Toutes ces cultures nécessitent des opérations de séchage plus ou moins poussé avant le stockage si l'on veut obtenir une bonne conservation des produits.

Les cultures vivrières et cultures de rente sont généralement récoltées entre la fin septembre et le début novembre. Le séchage de ces denrées débute donc en octobre pour se terminer en janvier. Durant cette période, les températures moyennes varient de 25,4°C à 28,3°C selon les zones (côtière, subtropicale, soudanaise, sahélo-soudanaise), l'humidité relative de 72 à 51 % et la tension de vapeur de 16,7 à 13,6 mm de mercure (Marchés tropicaux n° 1493/1974 et n° 1684/1978).

Une partie des grains récoltés est perdue avant même d'être consommée. Ces pertes le long de la chaîne post-récolte sont imputables à des méthodes inadéquates de séchage, de manutention, de stockage et de transformation. Le séchage étant la première étape du système post-récolte, c'est à ce niveau que débute les pertes sus-mentionnées. Au Sénégal, le séchage des céréales se fait en grande partie au champ pour presque toute la récolte, sauf pour une faible partie destinée à l'autoconsommation immédiate. Dans certains cas, lors de la récolte, les plantes entières sont coupées et séchées

au soleil, à même le sol. Dans d'autres cas, les épis sont coupés et empilés en vrac ou liés en bottes d'environ 10 kg, formant ainsi de gros tas de séchage sur le sol. Dans ces conditions, le séchage dure 7 à 8 semaines et les grains sont l'objet d'attaques de rongeurs, d'insectes, de moisissures et d'oiseaux. L'amélioration de la technique du séchage au soleil permet : d'utiliser au maximum le rayonnement solaire et les autres facteurs climatologiques; de réduire les contaminations et pollutions diverses et de produire des denrées de meilleure qualité et de réduire la durée nécessaire pour sécher les produits agricoles, donc les dégâts causés aux récoltes par des précipitations soudaines, les insectes, les oiseaux et les rongeurs (Fournier, 1980).

Le but de cette étude consistait donc à tester de nouveaux prototypes de séchoirs susceptibles d'améliorer le séchage des céréales locales, du mil souna en particulier. Il s'agissait d'un crib-séchoir utilisant les courants d'air naturels de convection, et de quatre prototypes de séchoirs utilisant des capteurs solaires. Les essais ont été menés en 1977 et 1978.

Matériel et méthodes

Le crib-séchoir

Le crib-séchoir (fig. 1) consiste en une structure parallélépipédique en bois de 5 x 2 x 2 m, soit un volume de chargement de 20 m³. Elle est surélevée de 30 cm par rapport au niveau du sol afin d'assurer une bonne circulation de l'air tout en empêchant les attaques de rongeurs et des petits animaux. La base et les côtés du crib sont recouverts par un grillage métallique. Le rônier est utilisé comme bois de construction à cause de sa disponibilité et de sa résistance aux termites.

Le grain utilisé était du mil souna. Les épis étaient rassemblés en bottes d'une trentaine de kilogrammes placées en quinconce à l'intérieur du séchoir suivant une disposition symétrique à l'axe longitudinal.

Dix séchoirs de ce type ont été installés au village de Ndiamsil dans le département de Bambe, arrondissement de Lambaye en 1977 et 1978. Leur suivi devait comporter une étude sur le séchage effectif du produit et sur les aspects économiques. Cette étude s'est toutefois limitée à une analyse "coût-bénéfice".

Les séchoirs solaires

Quatre prototypes de séchoirs à ossature métallique ont été fabriqués et testés au Centre national de recherches agronomiques (CNRA) de Bambe en vue de connaître leur efficacité relative. Ces structures de 3 x 1 x 1 m sont recouvertes à chaque extrémité d'un double grillage, fin et grossier, pour empêcher les attaques de rongeurs. Le fond et les parois latérales de chaque séchoir sont recouverts de tôles peintes en noir. Les quatre prototypes se différenciaient par le type de recouvrement sur leur face supérieure, vitre ou tôle, et par la présence ou non de cheminée. Ainsi, il y avait : un séchoir sans cheminée, recouvert d'une tôle (SC/AT); un

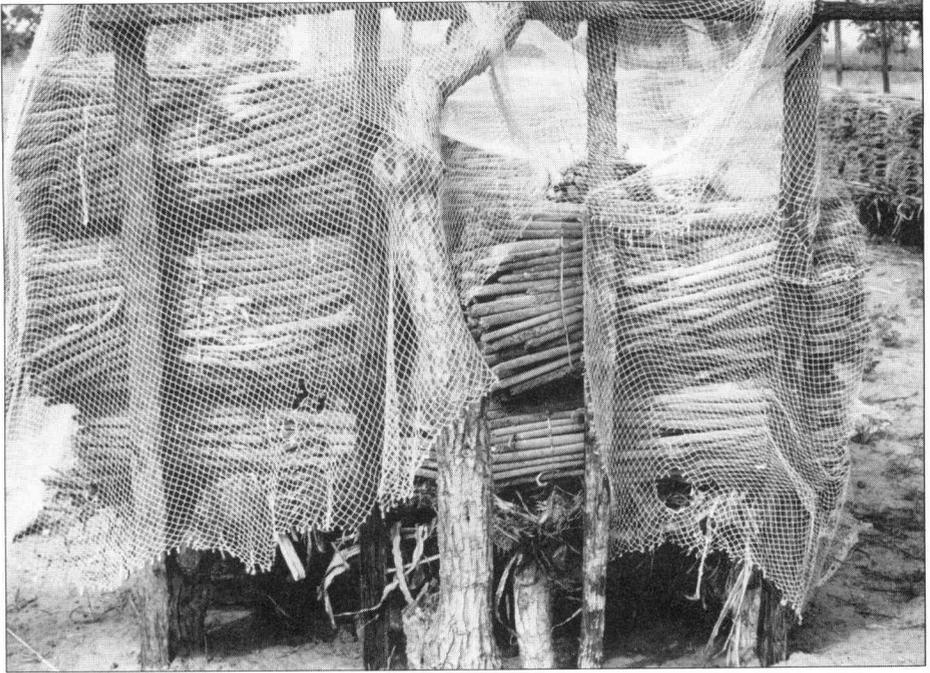


Fig. 1. Structure traditionnelle améliorée.

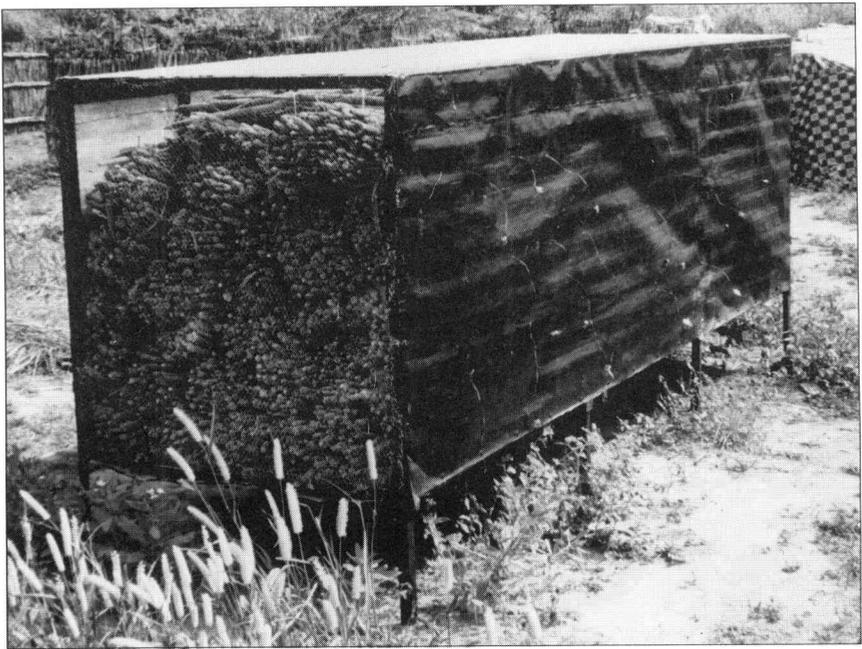


Fig. 2. Séchoir sans cheminée et avec vitre.



Fig. 3. Sêchoir solaire avec cheminée et avec vitre.

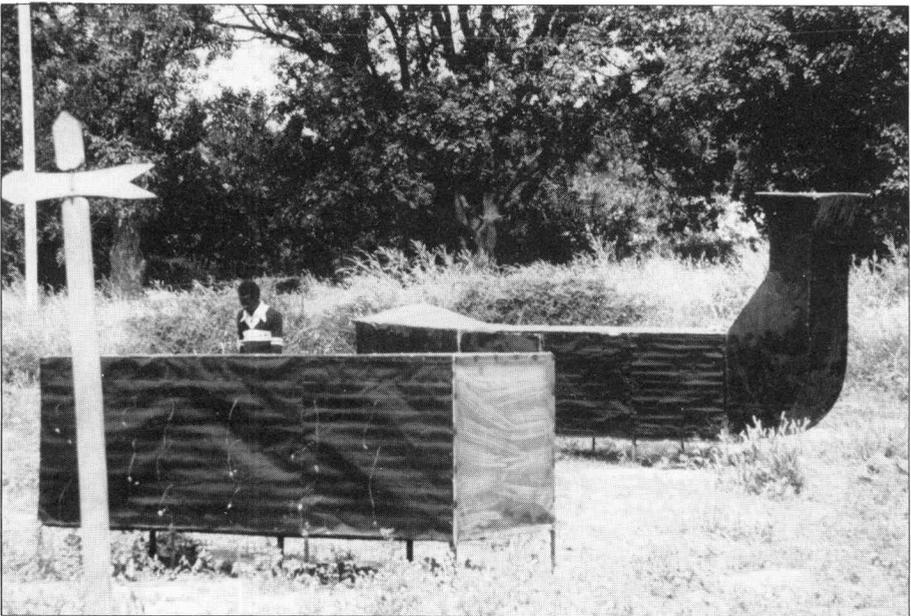


Fig. 4. Deux sêchoirs sans vitre; un avec cheminée, l'autre sans cheminée.

séchoir sans cheminée, recouvert d'une vitre (SC/AV); un séchoir avec cheminée, recouvert d'une tôle (AC/AT); un séchoir avec cheminée, recouvert d'une vitre (AC/AV) (fig. 2, 3 et 4).

Les cheminées ont une forme semi-parabolique. Elles ont été ajoutées à la structure afin d'activer l'écoulement de l'air chaud vers le haut. De plus, les séchoirs à cheminée étaient également pourvus d'une section conique à l'entrée pour mieux diriger l'air de l'extérieur vers l'intérieur du séchoir.

Afin de juger de l'efficacité du séchoir, l'évolution de la température du séchoir a été suivie. Parallèlement, la direction du vent, la vitesse de l'air à l'entrée du séchoir et la température de l'air extérieur ont été relevées afin de voir quels étaient leurs effets sur la température intérieure du séchoir et sur le séchage du produit.

La température à l'intérieur du séchoir était déterminée grâce à des thermocouples installés en plusieurs endroits : à 25 cm du fond, l'autre à 50 cm. Cette disposition des thermocouples a été répétée à 50 cm, puis à 75 cm du fond. Ce dispositif a été renouvelé tous les 25 ou 50 cm le long du séchoir. La vitesse de l'air a été relevée à partir d'un anémomètre "Florite", tandis que la direction du vent était donnée par une girouette installée à 2 m du sol. Les températures (sèche et humide) de l'air extérieur ont été déterminées à l'ombre avec des thermomètres ordinaires.

Pour chaque séchoir, les relevés se faisaient sur une période d'au moins 4 jours avec 3 à 6 lectures par jour. Chacun des séchoirs devait être chargé de 200 bottes, chaque botte pesant 7 kg. Ce dispositif devait permettre de suivre l'évolution de la teneur en eau du grain, mais également de voir si l'air pouvait s'écouler facilement à travers la masse de grain.

Résultats et discussion

Le séchage en crib

Le suivi des dix cribs installés en milieu rural et en station a montré une durée de séchage variant entre 5 et 6 semaines, ce qui constitue un gain de 2 semaines par rapport au séchage traditionnel. La durée du séchage demeure cependant relativement longue par rapport à d'autres types de séchage, classique ou solaire par exemple.

En fait, le principal avantage du crib est qu'il permet de réaliser à la fois le séchage et le stockage de façon beaucoup plus efficace que les méthodes traditionnelles. Le fait de surélever le séchoir assure une meilleure ventilation, donc un séchage plus rapide, et tend à empêcher les rongeurs et une bonne partie des insectes d'atteindre la récolte. D'autre part, avec l'utilisation du crib, on réduit considérablement la surface exposée à la prédation des insectes, des oiseaux et des animaux tout en favorisant la circulation de l'air dans la masse du produit. Si les attaques dues à ces vecteurs sont proportionnelles à la surface exposée (hypothèse à vérifier), il y a lieu de croire à une réduction des pertes par le simple fait de regrouper la récolte sur une petite surface.

La durée de vie d'un tel séchoir étant estimée à 10 ans, l'analyse économique montre un coût de revient du séchage/stockage d'un kilogramme de mil-grain qui varie entre 8 et 10 F CFA,¹ ce qui représente 11,5 à 14,3 % du prix de vente officiel du mil (70 F CFA/kg). Il faudrait donc observer une réduction des pertes de 11,5 à 14,5 % pour justifier la construction d'un tel séchoir, en ne tenant compte que de cet avantage. Les avantages secondaires comme la libération rapide des parcelles et le regroupement de la récolte pour le battage mécanique seront moins tangibles aux yeux de l'utilisateur (Diop, 1979).

Le séchage solaire

Les tableaux 1 à 4 donnent les valeurs de la vitesse de l'air, de la température extérieure et de la température intérieure à différentes heures de la journée et pour chaque séchoir. Les observations ont été faites sur une période de 4 à 6 jours. En fait, si le séchoir solaire est performant, cette période doit suffire pour amener le grain à une teneur en eau suffisamment faible pour lui assurer une bonne conservation.

Ce que l'on constate à première vue, c'est que la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur dépasse rarement 10°C (tableaux 1 à 4). C'est là un très faible rendement quand on sait que certains types de séchoirs arrivent à des gradients de température intérieur-extérieur dépassant 30°C dans des conditions climatiques beaucoup moins favorables qu'au Sénégal (Diop, 1979). Cela s'explique du fait qu'il n'y a pas eu en réalité de capteur solaire alimentant correctement en air chaud le séchoir : la température à l'intérieur n'est pratiquement pas plus élevée que la température ambiante au soleil. D'ailleurs, quand le séchoir est complètement rempli d'épis, la plaque servant de surface absorbante est totalement sous la masse du produit à sécher, d'où son inutilité.

Afin de déterminer l'effet de la vitesse du vent, de la température extérieure et de l'heure de la journée, mais également s'il y a des différences significatives entre les quatre types de séchoirs, un modèle de régression linéaire multiple a été bâti autour de la variable dépendante qui est ici la température à l'intérieur du séchoir. Nous avons émis l'hypothèse suivante : la température à l'intérieur du séchoir dépend de plusieurs facteurs dont l'heure de la journée, la vitesse de l'air, la température extérieure ainsi que la présence de vitre ou de cheminée. Le modèle de régression linéaire multiple doit non seulement nous permettre de vérifier cette hypothèse, et éventuellement quantifier l'apport de chacun de ces éléments (variables explicatives) dans les variations de la température à l'intérieur du séchoir (variable expliquée), mais également de comparer les différents types de séchoirs. Le modèle peut être exprimé sous forme mathématique de la façon suivante :

$$Y = B_0 + B_1 (x^1) + B_2 (x^2) + B_3 (x^3) + B_4 (x^4) + B_5 (x^5) + e$$

Y = température intérieure
 x^1 = heure de la journée (de 8 h à 18 h)
 x^2 = vitesse de l'air

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

Tableau 1. Séchoir sans cheminée avec vitre.

Heure	Vitesse de l'air (mm/s)	Température extérieure (°C)	Température intérieure (°C)	Différence de température
<u>20 juin 1978</u>				
8 h 40	202,14	22,00	29,38	7,38
9 h 50	200,57	28,00	35,83	7,83
10 h 40	201,43	33,00	38,57	5,57
<u>21 juin 1978</u>				
10 h 00	212,38	32,00	38,52	6,52
11 h 55	229,19	35,00	40,52	5,52
16 h 00	230,10	39,00	47,00	8,00
17 h 00	223,43	38,00	42,05	6,05
17 h 40	218,62	31,00	38,79	8,79
<u>22 juin 1978</u>				
8 h 45	220,43	27,00	31,31	4,31
9 h 45	221,19	28,00	36,43	8,43
11 h 45	220,38	33,00	38,81	5,81
12 h 00	205,86	34,00	42,14	8,14
16 h 30	242,33	38,00	38,98	0,98
17 h 20	224,57	39,00	38,98	0,02
<u>23 juin 1978</u>				
8 h 30	205,95	27,00	28,48	1,48
9 h 30	228,48	27,00	32,76	5,76
10 h 30	238,76	28,00	38,57	10,57
11 h 30	241,62	32,00	40,31	8,31
13 h 10	205,43	34,00	42,93	8,93
13 h 40	223,19	37,00	43,50	6,50

- x^3 = température extérieure
 x^4 = présence d'une cheminée sur le séchoir (1, avec cheminée; 0, sans cheminée).
 x^5 = utilisation d'une vitre sur le dessus du séchoir (1, avec vitre; 0, sans vitre).
e = constante d'erreur

Comme le montrent les valeurs de t du tableau 5, aucun des coefficients B4 et B5 n'est significativement différent de 0 au seuil de 95 %. Autrement dit, la présence ou non de cheminée ou de vitre n'a aucune influence significative au seuil de 95 % sur la température intérieure du séchoir.

Par contre, les contributions de x^1 , x^2 et x^3 dans les variations de Y sont significatives au seuil de 95 %. En d'autres termes, l'heure de la journée, la vitesse du vent et la température à l'extérieur du séchoir contribuent de façon significative dans les variations de la température intérieure. On note d'ailleurs une forte

Tableau 2. Séchoir sans cheminée avec tôle.

Heure	Vitesse de l'air (mm/s)	Température extérieure (°C)	Température intérieure (°C)	Différence de température
<u>20 juin 1978</u>				
8 h 26	203,81	22,00	30,50	8,50
8 h 30	200,48	27,00	36,76	9,76
10 h 30	191,43	28,00	38,71	10,71
17 h 35	200,14	28,00	38,90	10,00
17 h 55	200,00	28,00	38,33	10,33
<u>21 juin 1978</u>				
8 h 20	200,43	27,00	29,05	2,05
9 h 00	203,52	27,00	33,62	6,62
10 h 00	240,00	33,00	38,62	5,62
15 h 30	237,48	41,00	42,83	1,83
16 h 30	231,71	39,00	43,48	4,48
17 h 30	218,38	37,00	39,07	2,07
<u>22 juin 1978</u>				
8 h 00	214,76	26,00	27,10	1,10
9 h 00	217,95	28,00	30,48	2,48
10 h 00	221,86	29,00	36,21	7,21
11 h 10	205,86	33,00	38,86	5,86
12 h 10	213,00	34,00	40,38	6,38
15 h 55	237,38	39,00	43,00	4,00
<u>23 juin 1978</u>				
8 h 05	217,52	21,00	27,93	6,93
9 h 05	209,19	23,00	29,19	6,19
10 h 05	233,25	28,00	33,64	5,64
11 h 05	259,76	32,00	36,24	4,24
12 h 05	208,43	33,00	37,90	4,90
12 h 30	201,62	33,00	39,07	6,07

corrélation entre l'heure de la journée et la température extérieure (coefficient de corrélation simple de 0,70). De toutes les variables explicatives, c'est la température extérieure qui semble avoir le plus d'influence sur la variable expliquée Y (Diop, 1979). Dans les études à venir, il faudra également voir l'influence de l'intensité du rayonnement solaire (puissance solaire) sur la température à l'intérieur du séchoir.

Conclusions

Le crib-séchoir présente un certain intérêt car il permet de réaliser à la fois le séchage et le stockage des grains d'une façon beaucoup plus efficace que les méthodes présentement utilisées par les paysans.

Tableau 3. Séchoir avec cheminée avec tôle.

Heure	Vitesse de l'air (mm/s)	Température extérieure (°C)	Température intérieure (°C)	Différence de température
<u>27 juin 1978</u>				
11 h 50	203,33	28,00	32,21	4,21
16 h 15	201,29	34,00	41,00	7,00
17 h 25	206,33	34,00	38,36	4,36
<u>28 juin 1978</u>				
8 h 30	258,81	27,00	29,29	2,29
8 h 40	238,30	27,00	30,55	3,55
9 h 30	316,48	28,00	33,45	5,45
9 h 40	298,50	28,00	35,35	7,35
10 h 30	333,24	33,00	37,43	4,43
10 h 40	319,70	33,00	38,15	5,15
11 h 30	332,81	33,00	39,52	6,52
11 h 40	333,70	33,00	41,30	8,30
<u>29 juin 1978</u>				
9 h 56	218,00	28,00	32,00	4,00
11 h 47	266,00	32,00	38,45	6,45
16 h 23	234,00	33,00	37,00	4,00
17 h 15	250,00	26,00	34,25	8,25
<u>30 juin 1978</u>				
8 h 58	237,14	27,00	29,98	2,98
10 h 32	224,76	31,00	37,69	6,69
11 h 55	268,57	33,00	40,50	7,50
12 h 45	272,86	37,00	44,93	7,93
15 h 07	299,05	37,00	44,95	7,95

Les séchoirs solaires réalisés au CNRA de Bambey ont donné de très faibles rendements comparativement aux fortes périodes d'ensoleillement que nous connaissons au Sénégal. Ceci est surtout attribuable à une mauvaise conception du séchoir lui-même. En fait, le séchoir est dépourvu de capteur solaire performant, ce qui a eu pour effet de réduire son efficacité à presque celle d'un crib : on a conçu en réalité une "boîte à séchage" où le produit à sécher joue le rôle d'absorbeur (Fournier, 1980). C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la présence de cheminée ou de vitre n'a pas été significative. En effet, lorsque le séchoir est bien conçu, la cheminée permet d'activer l'écoulement de l'air chaud, donc un meilleur séchage. D'autre part, les capteurs à plaque recouverte ont une efficacité supérieure à celle des capteurs à plaque nue, ceci jusqu'à un débit d'air de $300 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$; au-delà de ce débit, la température de l'absorbeur est si basse que les pertes par rayonnement sont faibles et les pertes dans la couverture prennent une importance relative. Le rendement du capteur nu est alors supérieur au rendement du même capteur couvert (Fournier, 1980).

Tableau 4. Séchoir avec cheminée avec vitre.

Heure	Vitesse de l'air (mm/s)	Température extérieure (°C)	Température intérieure (°C)	Différence de température
<u>19 juin 1978</u>				
8 h 10	200,00	26,00	28,71	2,71
9 h 25	200,00	28,00	32,55	4,55
10 h 35	254,76	29,00	36,21	7,21
11 h 40	266,67	32,00	39,71	7,71
12 h 53	250,95	32,00	38,10	6,10
14 h 08	220,95	32,00	40,14	8,14
<u>27 juin 1978</u>				
11 h 10	206,43	27,00	35,07	8,07
15 h 40	200,00	37,00	41,07	4,07
17 h 10	203,95	34,00	37,88	3,88
<u>28 juin 1978</u>				
8 h 05	220,95	23,00	28,21	5,21
9 h 05	207,05	27,00	33,38	4,38
10 h 05	222,29	29,00	36,31	7,31
11 h 05	346,62	29,00	39,64	10,64
15 h 05	258,81	35,00	42,55	7,55
<u>29 juin 1978</u>				
8 h 35	205,71	29,00	29,40	0,40
10 h 40	231,43	29,00	36,74	7,74
15 h 15	301,90	33,00	38,48	5,48
16 h 50	262,38	33,00	35,60	2,60
<u>30 juin 1978</u>				
8 h 30	214,29	26,00	29,83	3,83
10 h 00	244,76	28,00	35,33	7,33
11 h 30	265,71	33,00	39,83	6,83
12 h 45	255,24	34,00	45,17	11,17
14 h 20	260,48	37,00	47,33	10,33

Cette étude des séchoirs solaires est donc à repenser de façon globale, l'accent devant être mis sur la conception d'un capteur performant. Ce n'est qu'à cette condition que l'on pourra utiliser avantageusement l'énergie solaire qui ne fait pas défaut au Sénégal.

Perspectives

L'évolution de l'agriculture sénégalaise entraînera une utilisation de plus en plus généralisée des séchoirs agricoles, même si dans le contexte actuel, ces séchoirs ne se justifient pas pour la majeure partie des céréales principalement dans la zone nord et centre-nord.

Tableau 5. Principales statistiques de la régression linéaire et tableau de variances.

	Degrés de liberté	Somme des carrés	Somme des χ^2
Régression	5	1 551,79	310,36
Erreur	80	467,18	5,84
Total	85	2 018,97	
		R = 0,77	F ¹ = 53,15

Coefficient	Variable correspondante	Erreur type	Valeur de t
B0 = 4,863	--	--	--
B1 = 0,299	heure du jour	0,1245	2,4 ¹
B2 = 0,0217	vitesse du vent	0,00825	2,63 ¹
B3 = 0,7575	température extérieure	0,0894	8,48 ¹
B4 = -0,854	présence ou non de cheminée	0,613	-1,39 NS ²
B5 = 0,904	présence ou non de vitesse	0,537	1,68 NS ²

1. Significatif au seuil de confiance de 95 %.

2. Non significatif.

L'énergie solaire étant largement disponible, on s'orientera vers la conception de séchoirs solaires. En effet "par comparaison au séchage naturel, les techniques solaires les plus simples permettent une réduction du temps de séchage de 50 % en moyenne. Outre ce critère quantitatif, la qualité du produit est presque toujours améliorée : les valeurs élevées de la température dans le séchoir arrivent à éliminer les risques d'infestation; de même, la teneur initiale en protéines est pratiquement retrouvée" (Fournier, 1980).

Il s'agira donc de reprendre les études sur les séchoirs, ce qui nécessite la mise au point d'un générateur d'air chaud le plus performant possible à partir des matériaux disponibles localement :

tôles plates, tôles ondulées, films plastiques, etc. Les performances du séchoir seront mesurées à partir des éléments suivants : gradient de température intérieur/extérieur; courbe d'évolution de l'humidité du produit; temps de séchage du produit; pouvoir germinatif de semences; valeur alimentaire et qualités organoleptiques du produit; durée de vie du séchoir et coût du séchage.

Du point de vue économique, le critère de rentabilité impose une utilisation du séchoir la plus étendue possible. Il faudra donc diversifier la gamme des produits à sécher et les échelonner sur toute l'année (Fournier, 1980).

Quoi qu'il en soit, des études préliminaires doivent clairement démontrer la viabilité économique de telles structures et leur supériorité par rapport aux méthodes actuellement utilisées. Le séchage étant pratiquement la première étape post-récolte, il apparaît évident qu'une modification des structures à ce niveau doit s'accompagner d'une égale modification des étapes subséquentes comme le battage, le stockage, et la transformation, afin de donner au système toute son efficacité.

Besoins futurs en recherches sur le séchage solaire

Nous avons dit plus haut que l'utilisation de séchoirs solaires pour les céréales ne se justifie pas économiquement dans la zone centre et centre-nord du Sénégal. En effet, les niveaux de prix actuels et l'inorganisation de la filière céréalière n'autorisent aucun investissement supplémentaire de la part des producteurs. Ceux-ci ne s'engageront dans cette voie que si des prix rémunérateurs sont appliqués et s'ils ont des débouchés sûrs pour l'écoulement du surplus de production.

Ceci ne signifie pas qu'il faille arrêter les recherches sur le séchage solaire. Les producteurs du Sud et du Sud-Est sont confrontés à de réels problèmes de séchage de leurs récoltes (riz, maïs, sorgho, sanio). Avec la mise en route du barrage de DIAMA, le système de la double culture qui est envisagée nécessitera l'utilisation de séchoirs par les producteurs. Enfin, certaines denrées alimentaires comme le poisson et les légumes nécessitent un séchage adéquat pour une meilleure conservation. Des recherches sur le séchage de ces différentes denrées sont donc pleinement justifiées. Ces recherches doivent partir des besoins réels et des possibilités technico-financières des utilisateurs potentiels.

Bibliographie

- Diop, A. 1979. Projet 3-P-760026 Technologie post-récolte. Résultats techniques. ISRA-CNRA Bambey, Sénégal.
- Fournier, M. 1980. Théorie du séchage. Intérêt et pratique des capteurs plans. Technologie des séchoirs agricoles solaires. Intérêt des solutions polyvalentes. In Conservation des denrées alimentaires cultivées en climat chaud et humide. Actes du premier colloque international de technologie tenu à Yaoundé, Cameroun, du 5 au 10 novembre 1979. Association des universités partiellement ou entièrement de langue française (AUPELF).

Marchés tropicaux, n° 1493 du 21/06/74 (numéro spécial). Sénégal
1960-1973 : 14 ans de développement économique et social.

Marchés tropicaux, n° 1684 du 17/02/78. L'industrie sénégalaise :
l'environnement socio-économique. L'agriculture, élément
essentiel de l'économie nationale.

PROBLÈMES ET SOLUTIONS RELATIFS AU SÉCHAGE SOLAIRE DES RÉCOLTES PAR CONVECTION NATURELLE

Michael W. Bassey¹, Malcolm J.C.C. Whitfield²
et Edward Y. Koroma³

Résumé — Le séchage solaire des récoltes est une pratique importante dans les pays en développement. On sait que les méthodes traditionnelles comportent plusieurs désavantages que l'on peut éliminer en utilisant l'énergie solaire comme source de chaleur dans un système de séchage amélioré. Malheureusement, ces séchoirs n'ont pas fait encore une percée importante dans les régions rurales. La présente communication expose les conditions réalisables à la mise au point de séchoirs solaires de récoltes à convection naturelle, en se basant sur l'expérience des recherches effectuées en Sierra Leone. Parmi les études examinées, mentionnons : l'évaluation des besoins initiaux; les conditions climatiques et sources d'énergie disponibles; les études expérimentales sur des séchoirs solaires et des séchoirs hybrides, avec indication des améliorations utiles qui leur ont été apportées ainsi que de leurs désavantages; les activités dont il faut tenir compte pendant les essais sur le terrain et les domaines possibles où il y aurait lieu d'accroître la recherche sur le séchage solaire. Les nombreuses expériences réalisées en Sierra Leone sur les séchoirs solaires nous renseignent quelque peu sur leur fonctionnement. Il conviendrait d'appuyer par des analyses les conclusions tirées de ces expériences en ce qui concerne la conception des cheminées, les courbes de séchage, les configurations des réchauffeurs d'air, l'accroissement du débit d'air, etc. Bien qu'il faudra déployer plus d'efforts techniques concertés à l'égard des séchoirs solaires avant de pouvoir les utiliser comme il se doit, on souligne que le succès de cette entreprise reposera sur les coûts et la bonne marche des essais sur le terrain, en faisant appel à une équipe multidisciplinaire.

1. Centre de recherches pour le développement international, B.P. 11007, C.D. Annexe, Dakar, Sénégal.

2. Department of Mechanical Engineering, University of Sierra Leone, Freetown, Sierra Leone.

3. Rice Research Station (Rokupr), P.M.B. 736, Freetown, Sierra Leone.

Introduction

Le séchage est un procédé important qu'utilisent presque tous les pays en développement pour conserver leurs aliments et autres produits non alimentaires. Les méthodes traditionnelles de séchage, bien que donnant des résultats satisfaisants dans certains cas, souffrent de quelques désavantages, plus particulièrement l'exposition des produits à la pluie, à la poussière, aux oiseaux et aux rongeurs ainsi qu'un séchage incomplet, qui se répercutent sur la qualité des produits. Pour certaines denrées alimentaires, un mauvais séchage provoque l'apparition de l'aflatoxine et d'autres moisissures toxiques qui sont très néfastes à l'homme et aux animaux.

On reconnaît généralement le besoin d'améliorer le séchage traditionnel et, partant, la qualité et la quantité des produits pouvant être manipulés. À cause des diverses lacunes inhérentes au séchage traditionnel, l'intérêt s'est porté, au cours de la dernière décennie, sur la conception et l'utilisation de nouveaux systèmes de séchage, principalement pour les denrées alimentaires, faisant appel à l'énergie solaire comme source de chaleur. Bien que certains de ces séchoirs solaires se révèlent prometteurs pour les applications rurales, leur usage ne s'est malheureusement pas généralisé dans les pays en développement et ce, pour plusieurs raisons.

Plusieurs études ont eu lieu en Afrique afin de mettre au point des séchoirs solaires pour des produits comme le bois en grumes (Okoh, 1985), le riz (Basse, 1982b), l'oignon (Ba et al., 1982), les légumes (Ali et Sakr, 1982), le pyrèthre (Sebbowa, 1985), le maïs (Johnston, 1984) et le poisson (N'Jai, 1985). D'autres études ont porté sur la valeur nutritive des aliments séchés (Gomez, 1982) ainsi que sur l'amélioration du rendement des séchoirs (Basse, 1982a, 1985a; Whitfield, 1985a; Othieno, 1985).

En dépit de la contribution de ces chercheurs et de bien d'autres parties intéressées, les agriculteurs d'Afrique ne sont pas nombreux à utiliser les séchoirs solaires. À notre avis, ce phénomène tient à six raisons.

- l'absence générale d'études préliminaires avant la construction d'un séchoir, afin de circonscrire les produits qui doivent subir un séchage;
- la taille des séchoirs ne répond pas aux besoins de l'agriculteur et en rend donc l'exploitation non économique ou inutile;
- le coût en capital élevé des séchoirs en raison du faible revenu de la plupart des agriculteurs ruraux;
- le piètre rendement des séchoirs en raison d'une mauvaise conception;
- un faible débit d'air dans les séchoirs en raison du phénomène de convection naturelle (la plupart des régions rurales ne disposent pas d'électricité ni d'une autre forme d'énergie qui leur permettrait d'accroître la circulation de l'air) et
- des essais insuffisants ou incomplets des séchoirs par leurs utilisateurs prévus.

Il est donc nécessaire de bien planifier les activités de recherche sur le séchage solaire afin d'obtenir des résultats valables qui conduiront à une plus grande popularité des nouveaux systèmes de séchage.

Compte tenu de ce qui précède, nous exposerons ici les méthodes que pourraient adopter les travailleurs affectés à la recherche et au développement du séchage solaire en Afrique. Pour que notre présentation corresponde davantage aux besoins en Afrique, nous recourons à des exemples de travaux effectués en Sierra Leone sur une période de plusieurs années. Toutefois, nous n'abordons que le séchage solaire par convection naturelle.

En premier lieu, nous dresserons la liste des études qu'il conviendrait d'effectuer avant la conception d'un séchoir, c.à-d. l'identification des cultures à sécher et la quantité d'énergie disponible à cette fin. Nous parlerons également de la conception, de l'élaboration et de l'exploitation des systèmes de séchage solaire ainsi que des problèmes qui leur sont associés. Enfin, nous proposerons les domaines qui pourraient être approfondis ainsi que les stratégies que l'on devrait utiliser pour obtenir des résultats utiles.

Conditions relatives au séchage

Les problèmes

Dans la pratique, lorsqu'on désire mettre au point un nouveau système de séchage solaire, il convient en premier lieu d'identifier le problème en cause. Compte tenu de la rareté des ressources monétaires, tant au pays que de l'extérieur, le problème devrait habituellement être d'importance nationale et sa solution, économiquement rentable.

Pour bien circonscrire un problème de séchage, on doit d'abord se mettre en rapport avec les personnes qui l'éprouvent. Des études sur le séchage solaire ont été effectuées en Sierra Leone à la suite de la participation de l'un des auteurs à une enquête nationale sur la technologie rurale qui visait à identifier les techniques traditionnelles qui nécessitaient une amélioration. Les contacts entretenus avec divers agriculteurs ont révélé que même si le séchage traditionnel donnait de bons résultats, il y avait place à des changements utiles. Bien qu'il ait été difficile à l'époque d'établir avec précision les produits qui pourraient tirer avantage d'un nouveau système de séchage, ces premiers contacts avec les agriculteurs ont permis de connaître leurs préoccupations et leur désir d'améliorer le séchage de leurs récoltes.

Évaluation des besoins

Bon nombre de projets de séchage solaire n'ont reposé que sur une identification superficielle d'un problème de séchage. Une telle approche est mauvaise et pourrait facilement conduire à une solution ne convenant pas au bénéficiaire prévu.

Ayant établi que certaines récoltes pourraient bénéficier d'une nouvelle méthode de séchage, une enquête a été réalisée sur tout le territoire de la Sierra Leone afin de recueillir des renseignements

plus détaillés sur les récoltes en question ainsi que de connaître l'opinion et l'expérience des agriculteurs. En se basant sur la connaissance des domaines d'activités agricoles et en tenant compte de nos restrictions au niveau du transport en commun et des ressources humaines, on a délimité les régions d'enquête (fig. 1). Le questionnaire a été mis au point par l'un des auteurs (un ingénieur-mécanicien) sans faire appel à un spécialiste des sciences sociales. Les enquêteurs étaient des étudiants de troisième année en génie mécanique qui pouvaient parler la langue des diverses régions visitées. Tous ont reçu une formation complète sur les aspects de l'enquête. Les agriculteurs qui participaient au sondage ont été prélevés au hasard tandis que l'un des auteurs et un adjoint de recherche se chargeaient de superviser les enquêteurs dans leur travail sur le terrain.

Bien que la méthode d'enquête ait donné de bons résultats, il aurait été bon de mieux structurer certains aspects : p. ex., un questionnaire avait été mis au point sans l'aide d'un socio-économiste. C'est là une pratique courante dans les projets visant à élaborer des techniques destinées aux régions rurales; c'est également une pratique qui devrait être modifiée, mais certaines contraintes limitent la collaboration multidisciplinaire.

Un grand nombre de socio-économistes en Afrique ne travaillent pas en milieu rural et manifestaient donc, jusqu'à tout récemment, un intérêt limité dans la mise au point des technologies. En revanche, les ingénieurs et les physiciens n'ont soit aucun désir de solliciter la participation des socio-économistes ou ne savent pas comment entretenir des rapports avec eux. Dans l'enquête qui nous intéresse, le manque de temps et l'absence de moyens de transport ont rendu difficiles les contacts avec les économistes agricoles et les autres spécialistes non techniques qui auraient pu apporter une contribution valable pendant la préparation du questionnaire et le travail sur le terrain.

Étant donné que les enquêteurs provenaient de leur propre district, il leur était relativement facile d'obtenir des renseignements fiables des agriculteurs. Qui plus est, le fait que les enquêteurs connaissaient très bien les besoins des agriculteurs et de l'enquête a une très grande influence sur le succès de l'enquête.

Résultats typiques de l'enquête

Le questionnaire utilisé était simple à remplir. Les données des quelque 700 questionnaires recueillis ont ensuite été analysées et publiées (Basse, 1982b). Nous présentons ci-dessous un bref aperçu des résultats typiques obtenus.

Trois méthodes de séchage des récoltes ont été indiquées au cours de l'enquête : à l'air libre, au-dessus d'un feu et à l'intérieur de silos traditionnels. Le séchage à l'air libre constituait la méthode la plus utilisée, bien qu'environ 20 % des agriculteurs recouraient au feu : les chiffres réels dépendent des cultures à sécher. En général, les agriculteurs étaient satisfaits de la méthode traditionnelle de séchage qu'ils utilisaient, mais ils désiraient obtenir un produit de meilleure qualité pour la plupart de leurs récoltes. Ils voulaient diminuer le temps de séchage du riz et les pertes de cette céréale, la plus cultivée parmi les agriculteurs (fig. 2).

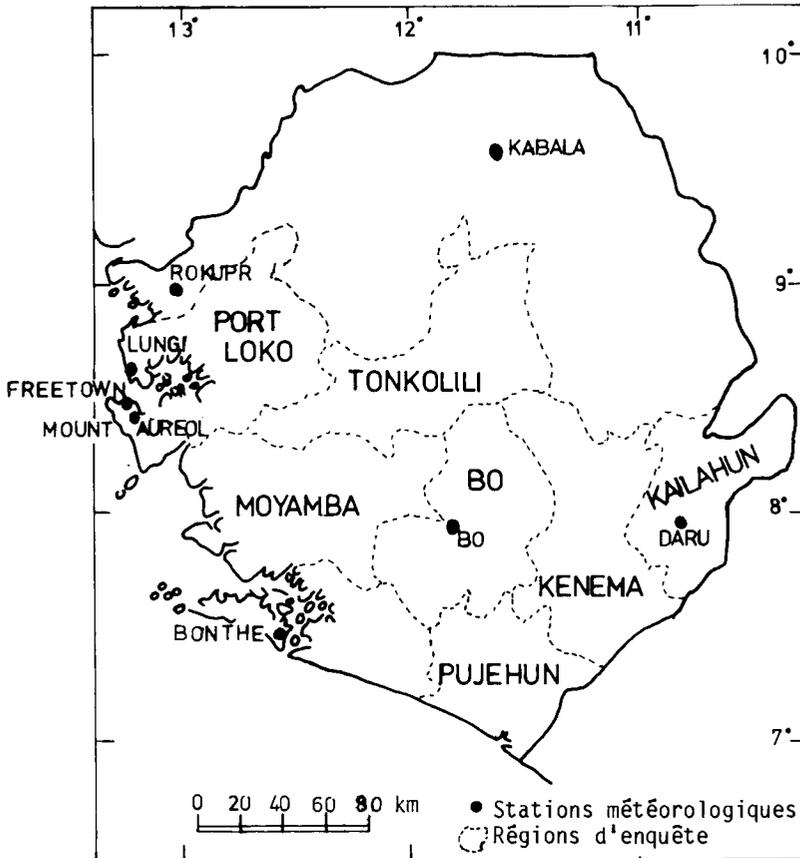


Fig. 1. Indication des régions où s'est déroulée l'enquête sur les méthodes traditionnelles de séchage, et emplacement des stations où des données météorologiques ont été obtenues, Sierra Leone.

D'autres données sont également apparues : le pourcentage d'agriculteurs (pour la superficie totale de chaque culture) cultivant diverses superficies de terre; la quantité des produits des diverses cultures mis à sécher par les agriculteurs; les pertes que subissaient les agriculteurs pour chaque récolte; le temps de séchage de chaque récolte; le montant que les agriculteurs étaient prêts à payer pour obtenir un meilleur système de séchage de leurs diverses récoltes et le pourcentage d'agriculteurs qui pratiquaient diverses cultures pour la vente ou pour l'autoconsommation. Ces résultats constituent un point de départ à la conception des séchoirs solaires. En Sierra Leone, la plupart des cultures recensées dans l'enquête sont récoltées pendant la saison sèche, c.-à-d. d'octobre à mai (fig. 3). D'après les données de l'enquête, on peut établir la capacité des séchoirs pour qu'elle soit rentable. En outre, les résultats de l'enquête indiquent qu'il est possible d'utiliser un séchoir pour plus d'une culture afin d'en maximiser l'exploitation.

Bien que l'utilité d'une évaluation des besoins soit indéniable, les résultats peuvent se révéler assez décevants si le questionnaire

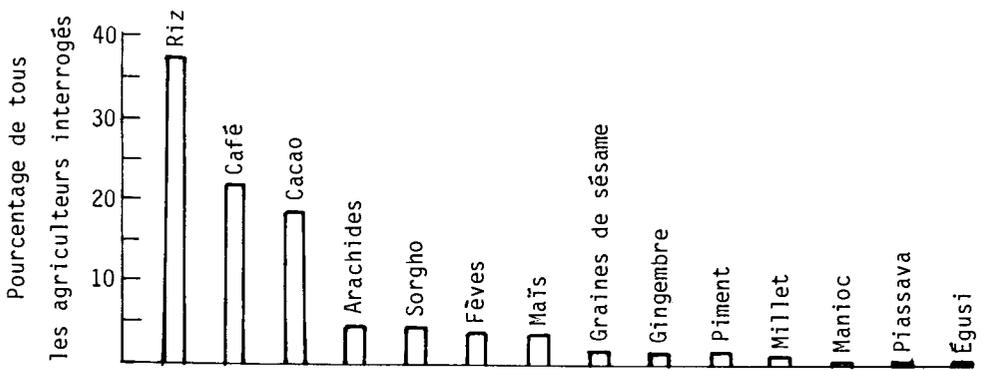


Fig. 2. Pourcentage des agriculteurs interrogés qui cultivaient une culture particulière.

Cultures	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M
Riz			-----									
Cacao		-----										
Café							-----					
Arachides	-----											
Millet					-----							
Piment	-----											
Gingembre							-----					
Maïs		-----										
Sorgho							-----					
Graines de sésame							-----					

Fig. 3. Période de récolte des diverses cultures en Sierra Leone.

n'est pas bien conçu. L'interview peut comporter trop de questions ou pas assez. Par exemple, un questionnaire long peut ajouter au dépouillement des données surtout lorsqu'on n'a pas accès à un ordinateur, comme l'a déjà signalé Bassey (1982b). Lorsque la chose est possible, la conception du questionnaire et l'interprétation des résultats devraient être faites par une personne expérimentée dans l'analyse de résultats d'enquête.

Le problème de dimension des séchoirs solaires et leur coût élevé en capital, mentionnés précédemment comme deux des raisons expliquant l'inapplication de ces technologies, peuvent être partiellement résolus en effectuant une première enquête sur les besoins et les opinions des agriculteurs. Les chercheurs n'ont pas adopté systématiquement cette approche, comme on le mentionne précédemment, d'une part parce qu'il s'agit d'un exercice frustrant et long, et d'autre part parce qu'il faut pouvoir compter sur un personnel fiable et des moyens de transport.

Pour la Sierra Leone, les résultats indiquent que le riz, le cacao et le café sont les trois principales cultures (fig. 2) auxquelles pourrait le mieux s'appliquer un nouveau système de séchage. Étant donné l'importance nationale du riz, les travaux ont porté sur la mise au point de nouveaux systèmes améliorés de séchage pour cette céréale. Le café et le cacao constituent principalement des cultures d'exportation.

Qualité et caractéristiques du séchage

On sous-estime souvent la nature multidisciplinaire du séchage solaire. Dès que l'on a établi que des études sur le séchage solaire s'imposaient pour une culture particulière, il faut obtenir certains renseignements avant de mettre au point un système de séchage solaire. Parmi les renseignements de base nécessaires, mentionnons :

- la teneur en eau de la culture avant le début du séchage;
- la teneur en eau équilibrée de la récolte à la température d'entreposage;
- la température maximum permise de l'air et la durée d'une exposition continue à cette température;
- l'influence du taux de séchage, de l'exposition à l'énergie solaire et de la température de l'air sur la qualité nutritive et organoleptique de la culture et
- la nécessité d'effectuer des opérations de prétraitement sur la culture.

Il faut souvent obtenir des renseignements sur ces divers aspects de la recherche en faisant appel à des spécialistes de l'alimentation, à des microbiologistes, etc. Bien que l'on trouve souvent des données publiées sur un grand nombre de cultures, plus particulièrement sur la teneur en eau des cultures récoltées, et que ces données peuvent réduire les travaux à effectuer, bien peu d'études ont été réalisées sur les caractéristiques du séchage et sur la qualité des cultures en Sierra Leone. Dans le cas du riz, auquel on porte un intérêt depuis quelque temps, la documentation est plus abondante. L'expérience nous révèle qu'il est de la plus haute importance de bien comprendre avant tout les caractéristiques de séchage de la culture si l'on veut concevoir le séchoir pour qu'il donne un rendement optimum. Sinon, on risque de se retrouver avec un produit d'une qualité inférieure à celui qui serait séché par la méthode traditionnelle.

Conditions climatiques et énergie disponible

L'exploitation d'un séchoir solaire doit d'abord reposer sur une connaissance des conditions climatiques et sur la disponibilité de l'énergie solaire. Toutefois, les données météorologiques fiables dans bon nombre de pays d'Afrique sont souvent difficiles à trouver à cause d'un manque de matériel, d'un piètre entretien des dispositifs et d'un personnel incompetent. La Sierra Leone ne fait pas exception et bien que le pays compte plusieurs stations météorologiques, elles sont dans un état assez lamentable. Elles sont mal entretenues et ne possèdent pas certains appareils importants. En outre, lorsqu'ils

existent, les dossiers des données climatiques ne se présentent pas sous une forme pouvant être facilement exploitée.

Données climatiques

Une étude a été réalisée afin de structurer certaines données météorologiques existant à plusieurs stations partout au pays. Des visites ont donc eu lieu à huit stations météorologiques (fig. 1) qui avaient recueilli des données pour 1970-1980. Les données ont permis de déduire la moyenne mensuelle des valeurs quotidiennes de la température maximum et minimum, l'humidité relative, le nombre de jours de pluie et la durée d'ensoleillement. Toutes ces données ont été publiées (Basse, 1982b).

La fluctuation des divers paramètres climatiques révèle que l'exploitation des séchoirs solaires dans le pays diffère d'un endroit à l'autre. Les régions à l'intérieur des terres sont susceptibles de bénéficier de durées d'ensoleillement plus longues, d'un rayonnement solaire plus intense et d'une humidité relative plus basse que les régions côtières. On observe environ six à huit heures d'ensoleillement de novembre à avril (saison sèche) contre deux à quatre heures de mai à octobre (saison des pluies). L'humidité relative atteint environ 80 % à longueur d'année.

Rayonnement solaire

On ne trouve réellement aucun renseignement sur le rayonnement solaire si ce n'est des données publiées par Basse et al. (1978) et Basse (1982b). La première étude tentait d'utiliser les valeurs du rayonnement solaire obtenues avec un matériel Gunn-Bellani à un endroit particulier pour déterminer une formule qui permettrait d'estimer le rayonnement solaire global au pays. Toutefois, à cause d'un mauvais entretien de l'équipement de mesure, les valeurs du rayonnement global étaient très inexactes et se rapportaient à des régions désertiques! La deuxième étude a utilisé les données climatiques d'une période de 11 ans ainsi que des données limitées sur le rayonnement solaire global pour estimer l'irradiation solaire à certains endroits un peu partout au pays (fig. 4).

Bien que ces résultats permettent quand même d'effectuer des travaux utiles sur la mise au point de séchoirs solaires, on a toujours besoin de données fiables sur le rayonnement solaire pour au moins cinq ans. On ne pourra cependant atteindre ce but qu'avec un matériel alimenté à piles, étant donné l'incertitude quant aux approvisionnements d'électricité dans le pays. Il conviendra d'établir soigneusement les endroits et le nombre d'appareils nécessaires afin de pouvoir dresser des cartes correspondantes utiles du rayonnement solaire.

Sources auxiliaires de chaleur

En se fondant sur les résultats de l'enquête ainsi que sur les données climatiques pour la Sierra Leone, l'énergie solaire semble à elle seule insuffisante pour le séchage efficace de certaines récoltes pendant les périodes données. On a donc effectué des recherches sur une méthode simple qui brûlerait des déchets, comme de la sciure, dans un brûleur (Basse, 1983a). La méthode consiste à pratiquer un trou vertical dans le matériau tassé, d'approcher une flamme et de laisser

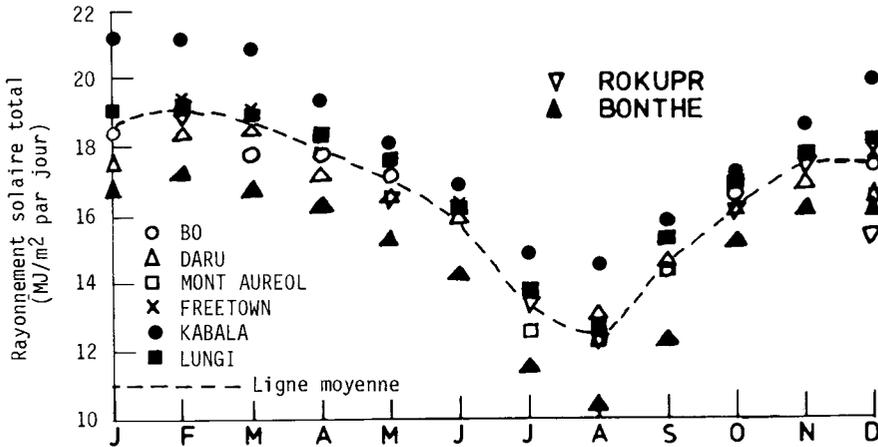


Fig. 4. Estimation du rayonnement solaire total quotidien en moyenne mensuelle pour divers emplacements en Sierra Leone.
Nota : Les valeurs pour le mont Aureol coïncident fréquemment avec celles pour Lungi.

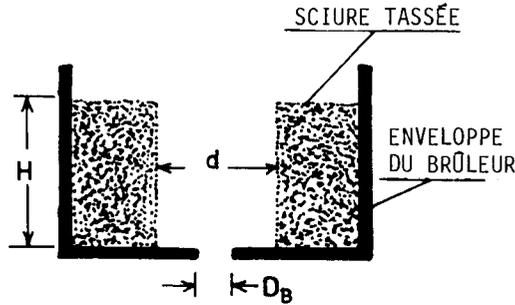
brûler le matériau à l'intérieur du trou (fig. 5). Les résultats rapportés par Bassey (1983a) avaient pour but de caractériser le processus de combustion et de mettre au point des équations mathématiques qui pourraient aider à concevoir des brûleurs utilisés à diverses fins. Ce brûleur a servi à produire de la chaleur pour faire fonctionner divers appareils, dont un séchoir hybride de récoltes (Bassey 1983b, 1985b).

Étant par nature intermittente, l'énergie solaire ne peut répondre à tous les besoins en matière de séchage. Cependant, il y a eu bien peu d'études dans les pays d'Afrique sur les systèmes auxiliaires pouvant servir à compléter le séchage solaire. L'usage d'une source complémentaire de chaleur n'est bien souvent pas économique, par exemple dans une application à très petite échelle, à cause de l'investissement initial nécessaire, mais dans un grand séchoir, le volume de la récolte pourrait justifier l'adoption d'un système du genre.

Conception et élaboration du matériel

Données et contraintes relatives à la conception

La plupart des séchoirs solaires sont mis au point sans tenir compte du produit à sécher. Dans bien des cas, on construit un séchoir pour ensuite déterminer son rendement avec diverses récoltes. Qui plus est, les séchoirs sont construits sans s'arrêter à certaines conditions météorologiques comme l'humidité relative ambiante, la température de l'air et l'énergie solaire disponible. On pourrait donc considérer le séchage solaire comme une "technologie en quête d'un problème" plutôt qu'une "technologie mise au point pour résoudre un problème". Cet angle d'approche doit être modifié.



D_B = diamètre de l'entrée d'air
 d = diamètre du trou du brûleur
 H = hauteur de la sciure tassée

Fig. 5. Vue en coupe du brûleur avec trou à travers la sciure.

Les renseignements nécessaires à la conception d'un système de séchage solaire doivent être recueillis au niveau de la ferme, auprès des stations météorologiques ainsi que dans la documentation. Les problèmes de conception surviennent en raison du besoin de garder les coûts du séchoir aussi près que possible du maigre revenu de tous les utilisateurs potentiels, étant donné le coût élevé des matériaux importés qui entrent dans la construction du matériel. Il faut également tenir compte du fait que l'électricité est une source d'énergie coûteuse et habituellement absente de la plupart des régions rurales, de sorte qu'on ne peut intégrer des ventilateurs pour la circulation de l'air réchauffé. Même avec ces contraintes, on peut concevoir des séchoirs solaires utiles (Bassey, 1982c).

Les séchoirs composés de capteurs solaires à air chaud et de chambres de séchage dans lesquels la circulation de l'air est assurée au moyen d'un ventilateur représentent des modèles courants. Toutefois, lorsque l'air doit circuler par convection naturelle, des problèmes surgissent à cause du faible débit de l'air. Il n'y a pas de bonne méthode qui permette de concevoir des séchoirs indirects à circulation naturelle, car les chercheurs n'ont pas approfondi les processus d'échange thermique et de circulation du fluide pendant l'exploitation de ces séchoirs, qui servent à établir un débit d'air en fonction de la température de l'air à travers le produit à sécher.

En Sierra Leone, les travaux relatifs à la conception des séchoirs solaires ont porté sur l'utilisation de sources de chaleur complémentaires, l'amélioration du débit d'air, l'utilisation de matériaux locaux et enfin la compréhension du fonctionnement des séchoirs indirects à circulation naturelle. Ce sont là des domaines où des progrès importants pourraient être faits.

Séchoir hybride

Bassey (1985b) a déjà expliqué les divers aspects de la conception et de l'exploitation du séchoir hybride, et nous n'en parlerons ici que brièvement. Le séchoir comporte deux éléments principaux : la chambre de séchage elle-même et un brûleur à sciure servant à générer une chaleur complémentaire (fig. 6). Le séchoir est

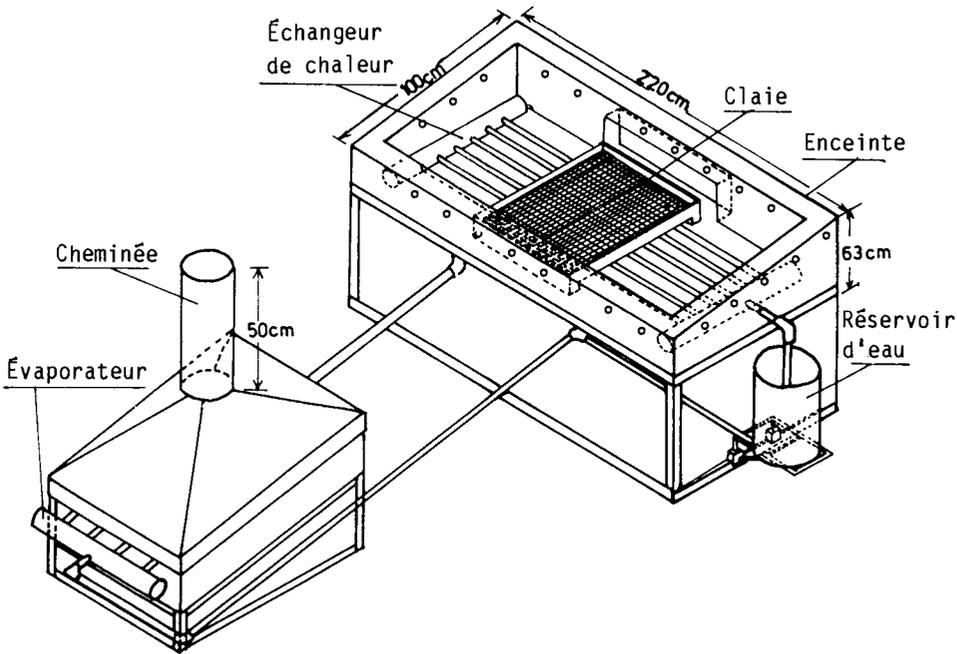


Fig. 6. Vue générale du séchoir solaire hybride équipé d'un brûleur à sciure.

un séchoir solaire direct qui, une fois chargé, peut générer des températures jusqu'à environ 70°C; c'est donc dire qu'il peut accepter une grande variété de récoltes. Sa conception repose sur des données touchant le rayonnement solaire, la quantité d'eau à évaporer d'une récolte typique, le principe de fonctionnement du séchoir à sciure (Basse, 1983a) et les techniques fondamentales d'échange thermique. On a estimé que le brûleur produirait une chaleur de 400 W/m² à l'entrée de la chambre de séchage et qu'il aurait une efficacité de 10 % en ce qui touche la transformation de l'eau en vapeur, que le condensateur afficherait un taux d'efficacité de 50 % et qu'une charge de sciure prendrait quatre heures à se consumer.

La chambre de séchage est faite en contre-plaqué (1,25 cm d'épaisseur) et ses parois doubles sont séparées par un isolant de 10 cm d'épaisseur composé de copeaux de bois. Des trous (2,5 cm de diamètre) pratiqués dans le fond de la chambre et près de l'extrémité supérieure des parois verticales permettent l'entrée et la sortie d'air dans le séchoir. Les produits à sécher étaient placés sur trois claies que l'on pouvait enlever par une porte à l'arrière du séchoir. La chambre était recouverte d'une vitre simple (0,16 cm d'épaisseur) ayant une superficie d'environ 2 m².

Le brûleur consistait en 28 trous (d'un diamètre initial de 2,5 cm) espacés de 10 cm centre en centre et disposés sur quatre rangées. Quatre tuyaux de fer galvanisé (110 cm de longueur, 2,5 cm de diamètre) étaient placés directement sur les trous de combustion.

L'eau des tuyaux s'évaporait et la vapeur produite passait sur les échangeurs de chaleur dans la chambre de séchage puis était aspirée à l'extérieur.

Des essais ont eu lieu à vide ainsi qu'avec une charge d'okra (*Hibiscus esculentus* L.). Les résultats indiquent que le séchoir hybride a donné de très bons résultats, produisant toute une gamme de températures selon les sources de chaleur utilisées.

À vide (fig. 7), le séchoir hybride a atteint une température de travail satisfaisante soit avec l'énergie solaire, soit avec la sciure, soit avec une combinaison des deux. Ainsi, dans des conditions d'ensoleillement (fig. 7b), il pourrait être inutile d'employer la source de chaleur complémentaire. Cependant, si l'ensoleillement baisse, on peut recourir au brûleur auxiliaire pour maintenir la température dans la chambre à un degré élevé (fig. 7a, jour 3). C'est le taux de rayonnement solaire qui détermine la fréquence de recharge du brûleur (pour tous les essais présentés à la fig. 7a, le brûleur n'a été rechargé que deux fois). Avec le brûleur seul, le séchoir peut conserver une température constante seulement si on recharge le brûleur (fig. 7c).

L'okra utilisé dans les essais a été coupé en morceaux de 1 cm et disposé sur les claies; environ 10 kg de ce produit était séché à chaque essai. La figure 8 présente les résultats typiques pour les trois modes de séchage. Les températures dans la chambre de séchage étaient largement fonction du rayonnement lorsque cette source d'énergie était la seule utilisée (figure 8a). Toutefois, en recourant au brûleur comme source complémentaire de chaleur, on peut maintenir la température du séchoir à un niveau assez constant en rechargeant plusieurs fois le brûleur à sciure (figure 8c).

Bien que le séchage à l'air libre donne le même taux de séchage que dans le séchoir fonctionnant à l'énergie solaire seulement (figure 8a, graphique de la teneur en eau), l'utilisation simultanée de l'énergie solaire et du brûleur (figure 8c) a diminué de moitié le temps de séchage. Ce qui est plus important, cependant, c'est que le brûleur assure le séchage même en l'absence d'ensoleillement (résultats simulés à la figure 8b, teneur en eau, par comparaison aux résultats du séchage à l'air libre), empêchant ainsi l'okra de moisir et de pourrir si le séchage était interrompu.

On a évalué la qualité de l'okra séché d'après sa texture, sa couleur et sa facilité de transformation en farine, comparativement au produit à l'air libre. À sa sortie du séchoir, le produit était plus vert et plus croustillant et pouvait être plus facilement broyé que l'okra séché à l'air libre. En outre, l'okra séché dans le séchoir ne présentait aucune trace de moisissure, ce qui n'était pas le cas avec le produit séché à l'air libre.

Le manque de fonds et de personnel ne nous a pas permis d'étendre la gamme des produits à sécher ni d'effectuer d'autres essais qualitatifs. Il conviendrait de poursuivre les travaux à l'aide de ce séchoir, mais en s'attachant à d'autres formes de déchets agricoles qui pourraient être utilisés dans le brûleur pour en améliorer le rendement global.

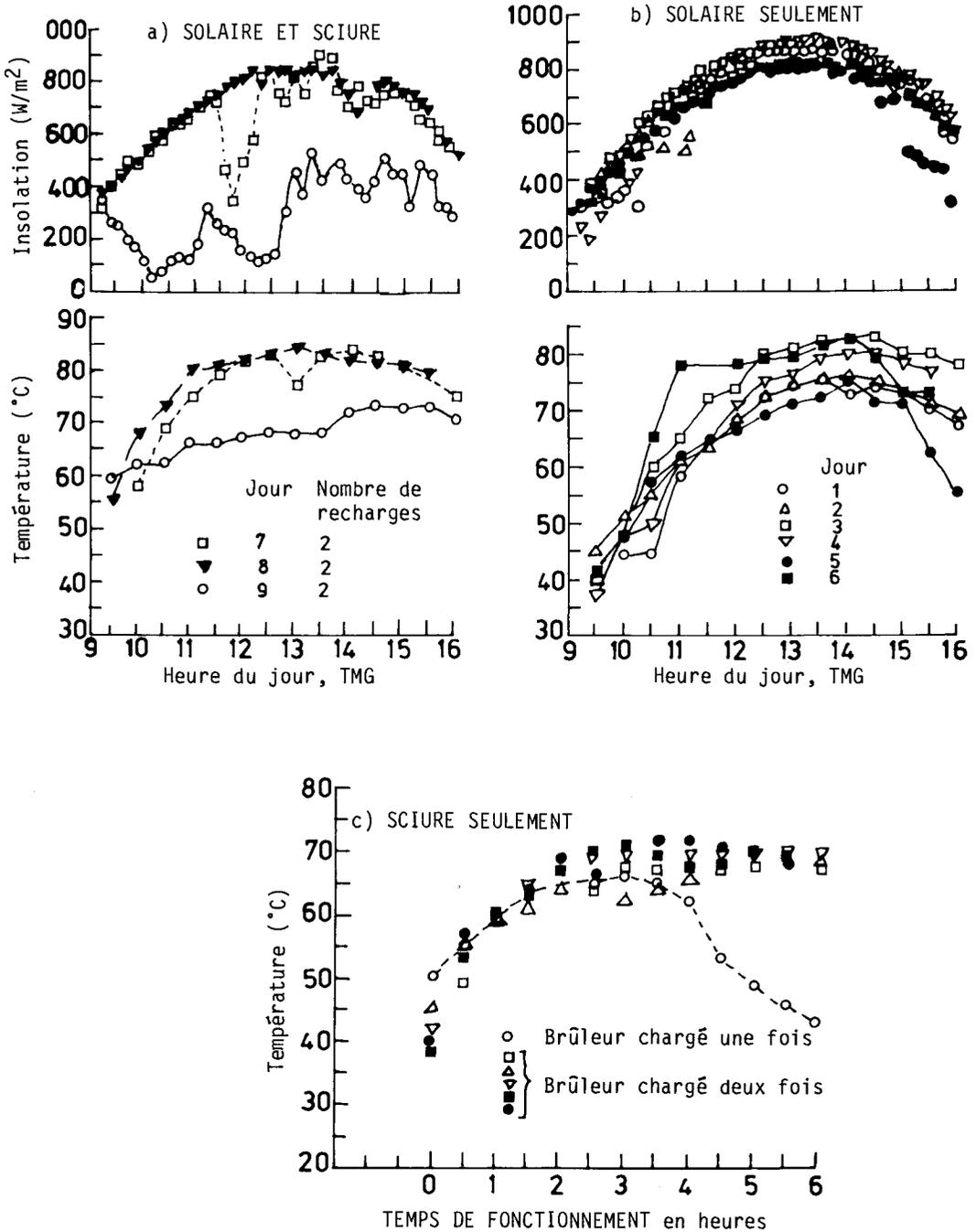


Fig. 7. Fluctuation des températures dans la chambre du séchoir hybride à vide en utilisant diverses sources de chaleur.

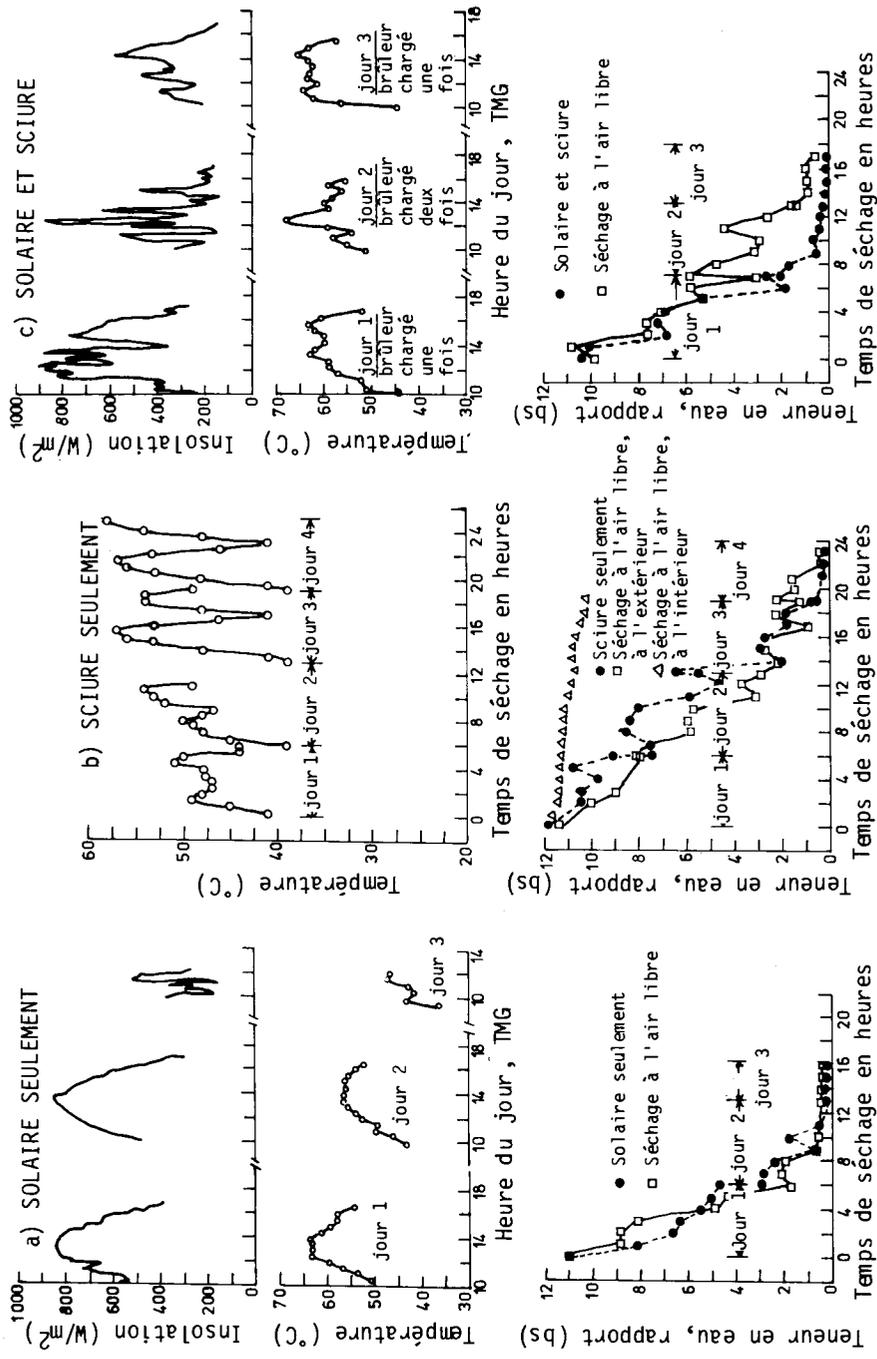


Fig. 8. Fluctuation des températures dans la chambre du séchoir hybride et courbes de séchage pour l'okra sous diverses conditions de fonctionnement.

Séchoirs indirects à convection naturelle

Ces séchoirs se composent de trois éléments : un réchauffeur d'air, une chambre de séchage et un appareil de circulation d'air. Les études effectuées en Sierra Leone ont porté sur l'amélioration des cheminées afin d'accroître le débit d'air réchauffé à travers le produit à sécher; sur la compréhension des relations entre les divers paramètres qui influent sur le fonctionnement de ces séchoirs et enfin sur les moyens d'améliorer les séchoirs de manière à les adapter davantage aux besoins locaux. La figure 9 présente les configurations du séchoir de base.

Circulation d'air et conception des cheminées

Les cheminées utilisées sur les séchoirs solaires à circulation naturelle sont de simples conduits cylindriques posés sur le dessus de la chambre de séchage. Bien qu'elles aient pour rôle d'accroître la circulation d'air à cause de la colonne d'air chaud qu'elles produisent (par rapport à l'air ambiant à l'extérieur de la cheminée), on les soupçonne en réalité de diminuer la circulation d'air pour diverses raisons.

Les études consistaient à utiliser des cheminées de configurations diverses ainsi que des réchauffeurs d'air de conception différente (fig. 9) reliés à des chambres de séchage identiques. On a mesuré les températures à divers endroits dans le séchoir mais on n'a pu consigner la vitesse de l'air, ne disposant pas des instruments appropriés. Les essais ont eu lieu à vide et avec charge (riz).

Les cheminées étaient toutes en fer galvanisé de 0,16 cm et avaient un diamètre intérieur de 15 cm. Voici les cinq modèles de cheminée utilisés : 38 cm de hauteur, non peinte; cheminée peinte en noir à l'extérieur; cheminée peinte en noir à l'extérieur et entourée d'un plastique transparent et cheminée de 180 cm de hauteur, peinte en noir à l'extérieur, ou peinte en noir à l'extérieur et entourée d'un plastique transparent. Lorsqu'une couverture plastique était employée, on laissait un espace de 2 cm entre celle-ci et la surface de la cheminée.

Bassey (1982a, 1985a) a rapporté et commenté les résultats de ce travail. Comme on ne mesurait pas la vitesse de l'air, les températures dans le séchoir ont servi à établir le rendement des cheminées. À l'aide des données obtenues sur une période de trois ans, on a pu tracer sur graphique les moyennes de l'intensité du rayonnement solaire en regard des températures moyennes dans la chambre de séchage à vide (fig. 10).

Bien qu'il y ait eu dispersion énorme du rayonnement à cause de la couverture nuageuse, les différentes cheminées ont donné des températures différentes. Pour une hauteur donnée de cheminée, c'est le séchoir avec réchauffeur d'air et passage d'air unique (séchoir I) qui a présenté les températures les plus élevées dans la chambre lorsque la cheminée était peinte en noir, puis recouverte ensuite de plastique. Les grandes cheminées sur le séchoir I ont donné des températures moins élevées. Dans le séchoir II, qui comporte deux passages d'air, les températures du séchoir ont diminué progressivement avec une cheminée peinte en noir et recouverte de plastique. L'allongement de la cheminée augmente la température du séchoir.

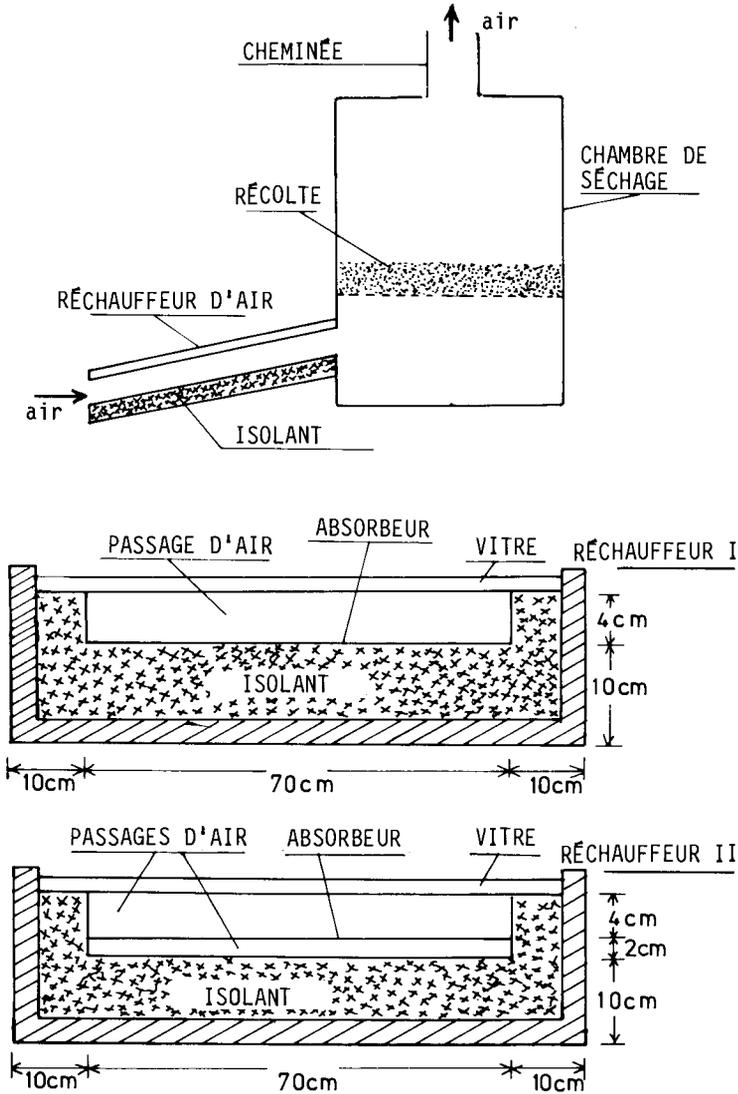


Fig. 9. Configuration de base du séchoir à convection naturelle et des réchauffeurs d'air utilisés dans les séchoirs.

On a expliqué les réponses obtenues (fig. 10) par une augmentation et une diminution possibles du débit d'air massique, attribuables à la chaleur récupérée ou perdue par la cheminée (Bassey, 1982a, 1985a). En outre, les températures sous le produit à sécher sont beaucoup plus élevées que celles dans la cheminée à cause de l'eau enlevée au produit par l'air en circulation. Il s'ensuit une diminution du débit d'air, d'où l'inefficacité du séchoir.

Par conséquent, à cause du rayonnement solaire intermittent et des conditions ambiantes, il faudrait utiliser de grandes cheminées

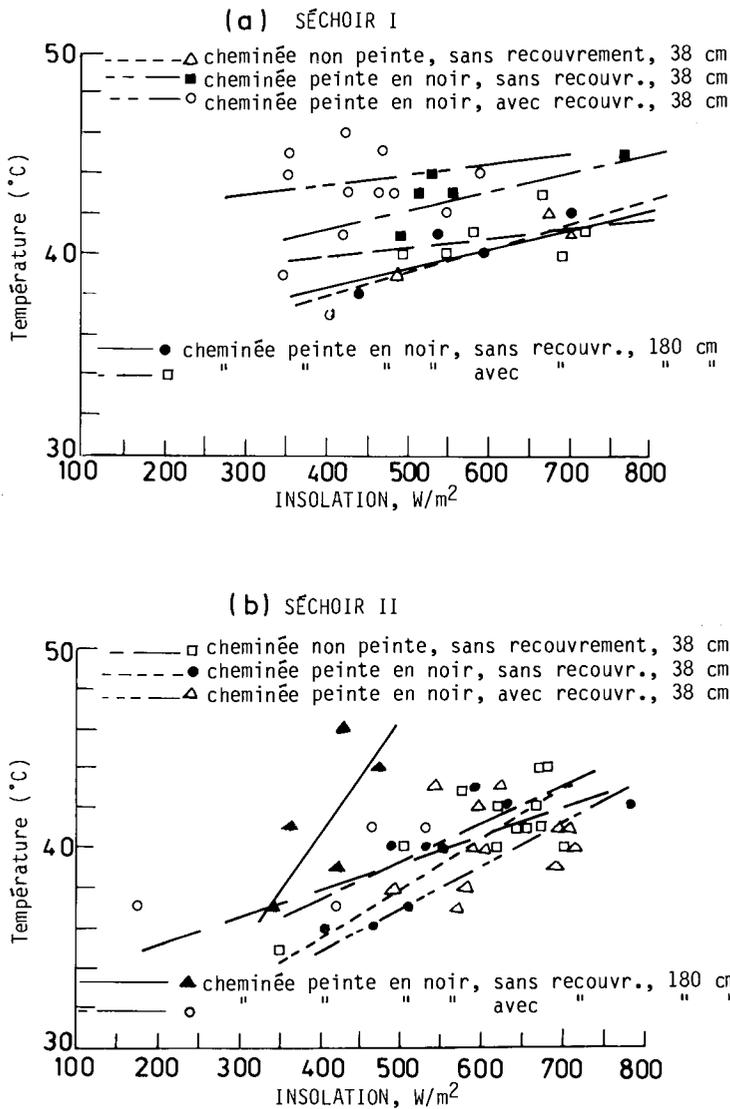


Fig. 10. Fluctuation des températures moyennes quotidiennes dans les séchoirs à vide selon l'intensité moyenne du rayonnement solaire, pour diverses configurations de cheminée.

peintes en noir uniquement sous un ciel clair, lorsqu'il n'y a peu ou pas de vent et que la température ambiante est élevée. Les cheminées courtes recouvertes d'un plastique transparent conviendraient aux journées nuageuses et venteuses afin de réduire les pertes de chaleur

par la cheminée. Ce genre de cheminée pourrait également servir dans les latitudes plus élevées lorsqu'il s'agit de réchauffer l'air à l'intérieur des cheminées pour accroître l'effet de thermosiphon.

Bien que ces résultats aient permis de mieux évaluer les améliorations que l'on pourrait apporter aux séchoirs, ils ne sont aucunement définitifs. Il est nécessaire de mesurer le débit massique d'air pour appuyer les conclusions présentées.

Paramètres influant sur le rendement des séchoirs

Outre les travaux effectués sur les modèles de cheminée, on a essayé de mieux comprendre le rendement des séchoirs solaires indirects sous diverses conditions.

Des comparaisons effectuées entre les deux réchauffeurs d'air présentés à la figure 9 indiqueraient qu'un réchauffeur simple avec passage d'air unique suffirait à répondre aux besoins des séchoirs à circulation naturelle (Bassey, 1985a). Des données utiles illustrant l'effet du rayonnement solaire sur les températures à divers endroits dans les séchoirs existent également pour ceux qui désirent approfondir les travaux. Qui plus est, Bassey (1982b) a expliqué le rendement relatif des séchoirs examinés avec des couches de riz de différentes hauteurs.

Il convient de mentionner que certains résultats touchant la variation de la teneur en eau du riz selon la durée indiquent une dispersion considérable lorsque la couche de riz est profonde (fig. 11). Le phénomène s'explique par le procédé d'échantillonnage utilisé. Pendant les expériences, la couche de riz était mélangée à fond avant de procéder à un prélèvement de quelques grammes pour en déterminer la teneur en eau (à l'aide de la méthode du four). Toutefois, certains échantillons étaient probablement représentatifs des grains au fond de la couche (où le riz était très sec) ou du dessus de la couche, où le riz était plus humide. Étant donné la très petite taille des prélèvements comparativement à la masse de riz mise à sécher dans le séchoir, on a observé une dispersion dans les données. (On a aussi constaté ce phénomène dans les résultats rapportés par certains auteurs.)

On pourrait obtenir des données plus fiables sur la teneur en eau en pesant la masse de riz pendant l'expérience. Toutefois, cette technique nécessiterait un matériel assez spécialisé que nous ne possédions pas au moment des essais.

Malgré ces inexactitudes apparentes dans les données sur la teneur en eau, les résultats ont quand même servi à mettre au point des simulations numériques du rendement des séchoirs indirects à convection naturelle (Oosthuizen et al., 1985).

Les études réalisées en Sierra Leone indiquent que l'exploitation des séchoirs solaires indirects à circulation naturelle est très complexe lorsque la couverture nuageuse est changeante. Bien que l'ennuagement entraîne une certaine dispersion des données, on peut établir une corrélation entre la moyenne des températures quotidiennes dans le séchoir et la moyenne de l'intensité quotidienne du rayonnement solaire. Des renseignements de ce genre permettent de comparer des séchoirs semblables.

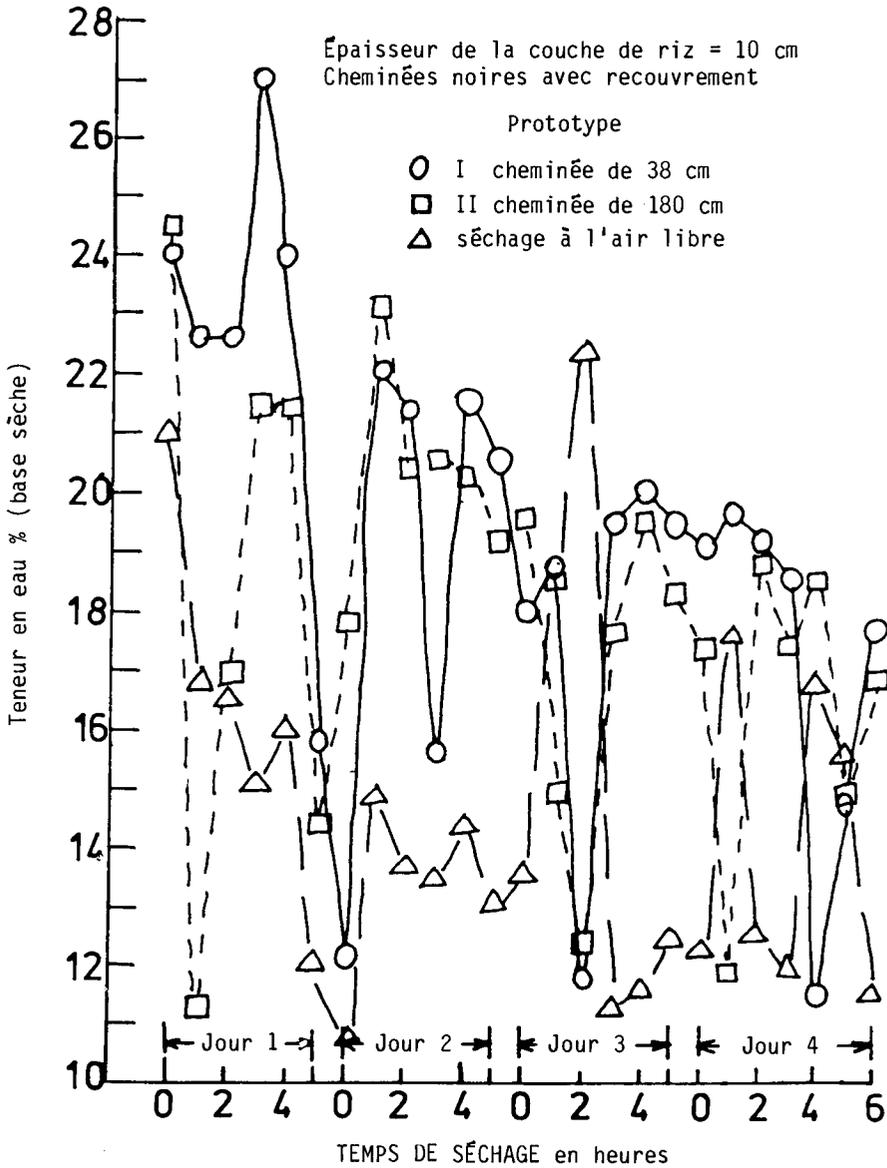


Fig. 11. Fluctuation de la teneur en eau du riz en raison de mauvais prélèvements.

De façon générale, les températures de l'air sous le produit à sécher sont plus élevées que dans un séchoir à vide. En outre, les températures au-dessus du produit à sécher sont très différentes de celles qui existent en dessous, qui se rapprochent souvent des conditions ambiantes. Ces observations laissent à penser qu'il pourrait être nécessaire de réexaminer l'hypothèse voulant que la densité de l'air dans tout le séchoir soit uniforme.

Taille des séchoirs à convection naturelle

En s'inspirant des travaux effectués sur un modèle de séchoir de base (Bassey, 1982b), Whitfield (1985b) a effectué d'autres études en Sierra Leone pour optimiser diverses dimensions du séchoir afin d'en arriver à un débit d'air optimum. Dans ce cas, toutefois, les températures ont été mesurées à divers endroits du séchoir alors que la vitesse de l'air était mesurée à l'intérieur de la cheminée, avec un séchoir à vide. Les résultats permettent d'expliquer l'effet du réchauffement, du refroidissement et de l'isolation de la cheminée. Il est cependant nécessaire d'obtenir des mesures détaillées du débit massique d'air et des températures de l'air dans un séchoir chargé afin de confirmer les explications dérivées des essais à vide. Toutefois, étant donné les relations complexes qui existent entre tous les principaux paramètres, il est difficile d'opter pour une explication ou l'autre qui reposerait uniquement sur les expériences, ou d'utiliser ce genre d'étude pour optimiser les dimensions des séchoirs.

L'isolation du séchoir par une couche de copeaux de bois de 7 cm d'épaisseur n'a que légèrement accru le débit massique d'air dans le séchoir à vide (Whitfield, 1985a). Il faudrait obtenir d'autres mesures avec un séchoir chargé pour appuyer ces observations.

Des essais à vide ont eu lieu pour connaître le diamètre optimum de la cheminée en utilisant le séchoir indiqué à la figure 9 équipé du réchauffeur I (Whitfield, 1984a). Le débit massique a augmenté avec le diamètre des cheminées (fig. 12). Bien que ces résultats illustrent que le diamètre de la cheminée pourrait être augmenté, des expériences avec un séchoir chargé auraient été beaucoup plus utiles. Toutefois, la collecte fastidieuse de ce genre de données dans les conditions qui existaient (c.-à-d. sans système approprié) constituait un obstacle.

Des travaux antérieurs effectués par Bassey (1982b) l'ont amené à recommander un réchauffeur d'air, comme celui à la figure 9, comportant un seul passage d'air de 4 cm de hauteur. Cette configuration dérivait de simples formules de calcul du débit fluïdique et des échanges thermiques ainsi que d'hypothèses basées sur l'expérience acquise avec des séchoirs à convection naturelle. Une autre recommandation touchant les dimensions des séchoirs stipulait que la surface de la couverture transparente du réchauffeur d'air devait être égale à la surface horizontale de la chambre de séchage. En outre, on a recommandé (Bassey, 1982a, 1985a) que les cheminées soient courtes (moins de 40 cm) et isolées pour éviter les pertes de chaleur vers l'extérieur. Les conclusions d'autres études (Whitfield, 1985b) laissent entendre que la superficie transversale de la cheminée devrait être de 16 % supérieure à la superficie horizontale de la chambre de séchage.

En l'absence de méthodes satisfaisantes pour calculer les dimensions des séchoirs, on peut utiliser ces recommandations comme lignes directrices. L'emploi de modèles informatiques permettrait de calculer des dimensions plus précises pour les diverses composantes des séchoirs à circulation naturelle, puisque ces modèles réduisent au minimum le nombre d'expériences nécessaires.

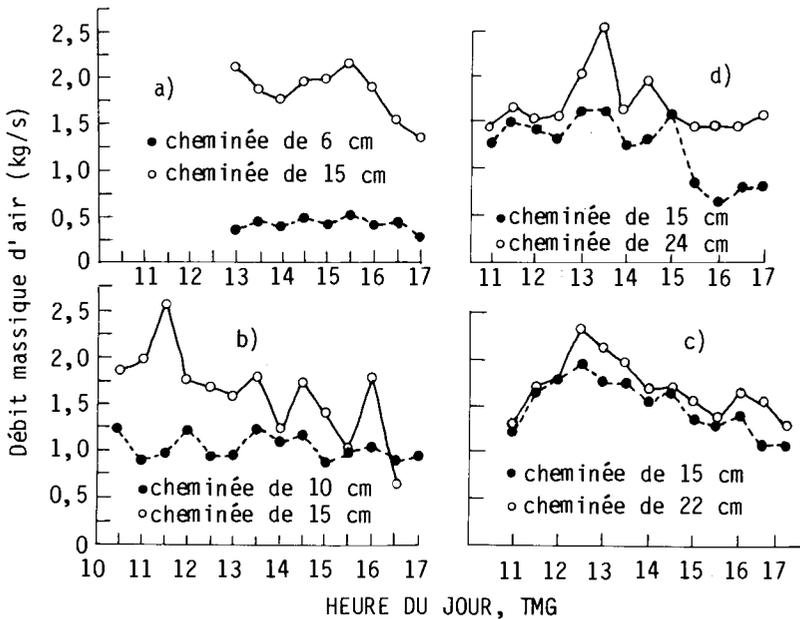


Fig. 12. Rapport entre le débit massique d'air et le diamètre de la cheminée dans un séchoir à vide utilisant un réchauffeur d'air à passage unique.

Matériaux de construction

Le coût élevé des matériaux représente l'un des obstacles à la mise en place d'un séchoir approprié. Il y a déjà eu certaines suggestions sur le choix des matériaux (Bassey, 1982c), mais l'évolution rapide de la conjoncture économique dans un pays comme la Sierra Leone risque de reléguer au second rang un modèle de séchoir qui, aujourd'hui, semblait pourtant approprié, à cause de la pénurie ou du coût élevé des matériaux de construction.

L'expérience acquise en matière de séchage solaire dans ce pays révèle que l'emploi de contre-plaqué, de vitre et de fer galvanisé comme principaux matériaux de construction ne convient pas à l'heure actuelle à cause de leur prix exorbitant. Par conséquent, on a réduit le coût en capital des séchoirs en les fabriquant avec des briques d'argile ou de boue. Actuellement, des essais ont lieu sur un séchoir fabriqué comme suit : parois en brique, réchauffeur d'air isolé avec de la paille, surface absorbante en fer galvanisé et couverture transparente en vitre. Ce séchoir (fig. 13) diminuera considérablement le coût en capital mais il faudra effectuer d'autres essais pour établir les répercussions de sa masse thermique sur son rendement. La chambre de séchage mesure 90 cm x 90 cm x 180 cm de longueur; la cheminée a un diamètre intérieur de 22 cm et une hauteur de 150 cm; le capteur solaire a une superficie de 180 cm x 90 cm et est orienté vers le Sud à un angle de 20° par rapport à l'horizontale.

Ce séchoir a servi à vérifier le rendement de divers matériaux transparents comme couverture du capteur (fig. 14). Bien que des



Fig. 13. Séchoir à convection naturelle en briques de boue.

matériaux transparents autres que le verre coûteraient moins cher, la température obtenue dans le capteur solaire avec un polyéthylène (plastique) ou une fibre de verre est beaucoup moins élevée que dans celui recouvert d'une vitre, et le séchage prend plus de temps. D'autres études sont en cours pour évaluer les avantages de ce séchoir bon marché.

Essais sur le terrain

En Sierra Leone, aucun essai significatif n'a été effectué sur des séchoirs solaires chez des agriculteurs ruraux : c'est d'ailleurs le cas en général pour la plupart des autres pays d'Afrique. Dans certains pays, comme en Sierra Leone, la R&D n'ont pas permis d'arriver à des modèles satisfaisants de séchoir solaire alors que dans d'autres, les chercheurs hésitent à s'aventurer hors des villages ou ne savent pas quelle méthode adopter.

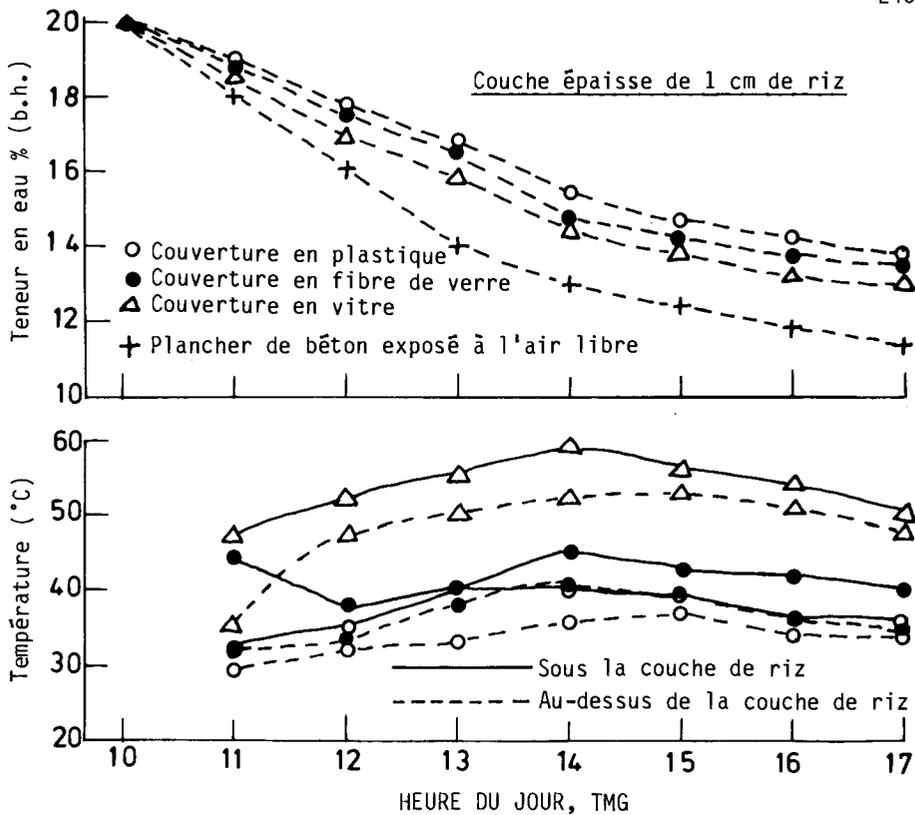


Fig. 14. Rapport entre le rendement du séchoir en briques de boue et le genre de couverture transparente utilisée.

En supposant qu'on mette au point un modèle de séchoir d'après les besoins des utilisateurs prévus et que le personnel de R&D soit disposé à entreprendre les études nécessaires sur le terrain, il conviendra de suivre certaines lignes directrices de base pour s'assurer que le séchoir subisse les essais appropriés dans des conditions réelles. Étant donné qu'il s'agit d'une activité multidisciplinaire, l'expérience suggère que l'équipe se compose au moins d'un technologue, d'un socio-économiste et d'un ou plusieurs vulgarisateurs. Le choix des emplacements d'essai dépend des récoltes disponibles, de la volonté des utilisateurs prévus d'adopter une nouvelle méthode et enfin de leur enthousiasme à collaborer aux essais. Le technologue et le socio-économiste devront veiller, pendant tous les essais, à visiter les emplacements pour effectuer des vérifications au hasard. Bien que la liste des huit activités dressée ci-dessous soit loin d'être complète, nous croyons qu'elle fournit un cadre de référence approprié pour effectuer les essais sur le terrain :

- choisir le modèle approprié de séchoir;
- choisir les emplacements des essais avec l'aide des vulgarisateurs et des socio-économistes;

- installer ou construire les séchoirs avec la participation active des utilisateurs et des vulgarisateurs;
- confier aux vulgarisateurs la tâche de surveiller le fonctionnement des séchoirs et de prendre en note les réactions des utilisateurs;
- mettre au point le questionnaire qui servira pendant les essais sur place à consigner les données sur le rendement technique, le coût du séchage et les réactions des utilisateurs;
- permettre à l'utilisateur de faire fonctionner le séchoir pour qu'il puisse en comparer le rendement avec celui de la méthode de séchage traditionnelle à l'air libre. Le vulgarisateur devra consigner certaines données de base comme le poids du produit à sécher avant et après le séchage, ainsi que le temps de séchage. Idéalement, l'essai devrait se poursuivre pendant au moins une saison de séchage;
- modifier le système de séchage, le cas échéant, pendant les essais et
- évaluer les résultats pour déterminer le rendement technique, la viabilité économique et l'acceptabilité sociale du séchoir.

Il ne faudrait pas sous-estimer l'importance des essais sur le terrain à l'intérieur d'un programme de R&D puisqu'ils permettent d'évaluer réellement si le séchoir solaire mis au point convient bien à la situation. Les chercheurs des pays d'Afrique devront déployer des efforts énormes pour introduire les systèmes de séchage parmi les populations rurales. Sans cette intervention, on peut s'attendre à ce que les séchoirs demeurent des objets de laboratoire, comme c'est le cas à l'heure actuelle.

Utilité possible de certains séchoirs

Les travaux entrepris en Sierra Leone sur le séchage solaire des récoltes révèlent qu'il serait plus économique de sécher plus d'une récolte dans un séchoir pendant la plus grande partie de l'année. Cependant, comme l'énergie solaire n'est pas disponible toute l'année pour produire la chaleur nécessaire, il pourrait être utile, dans certains cas, de recourir à des séchoirs hybrides.

Le séchoir hybride solaire/sciure ainsi que le séchoir indirect à convection naturelle décrits dans ces pages pourraient être utilisés dans plusieurs pays d'Afrique. Leur mise au point devra toutefois se faire rapidement à cause de la situation économique changeante. Ainsi, quelques agriculteurs pouvaient s'offrir ces deux types de séchoir il y a environ cinq ans lorsqu'ils étaient construits avec du contre-plaqué, du fer galvanisé et de la vitre. Aujourd'hui, à peu près personne ne les achètera puisque le coût des matériaux a décuplé dans certains cas.

En Sierra Leone, des études actives ont présentement lieu sur l'utilisation du séchoir solaire indirect pour le riz et des essais à la ferme devraient démarrer au début de 1987. Cependant, on ne prévoit pas effectuer d'essais sur le terrain du séchoir hybride, car

on n'a pas encore évalué complètement l'utilisation de matériaux de construction de faible coût.

La recherche future sur le séchage solaire

Les études effectuées en Sierra Leone laissent entendre qu'il faudrait approfondir la recherche pour améliorer le séchage solaire. Ces activités, l'évaluation des besoins en séchage, le travail en laboratoire ainsi que les essais des prototypes sur le terrain font l'objet des sections qui suivent.

Évaluation des besoins en séchage

Bien que l'on ait déjà réalisé une étude des besoins en séchage chez les agriculteurs en Sierra Leone, d'autres sondages s'avèrent nécessaires pour mieux comprendre encore le problème du séchage. Par exemple, il faudra entreprendre des études pour évaluer les quantités des récoltes qui doivent être séchées, leur répartition géographique, les pertes de revenu attribuables à un mauvais séchage, la capacité et la volonté des agriculteurs d'acheter un système de séchage, les capacités des séchoirs offerts et la possibilité d'accroître le revenu des agriculteurs par l'introduction de nouveaux systèmes de séchage.

En raison de leur nature multidisciplinaire, ces premières études doivent se faire à la fois avec des socio-économistes et des technologues. Il faut également sensibiliser les agriculteurs aux avantages potentiels des nouveaux systèmes.

Recherche en laboratoire

Il est nécessaire d'étudier l'effet du séchage sur la valeur nutritive et les qualités organoleptiques des récoltes. En outre, ces recherches devront s'employer à déterminer les températures de séchage et la durée optimums de séchage pour arriver au meilleur produit possible et ce, pour toute une variété de récoltes. De même, les répercussions du prétraitement sur la qualité des récoltes et sur leur durée de conservation méritent qu'on s'y arrête.

Pendant ces études, il conviendra que les ingénieurs, les biochimistes et que les spécialistes de l'économie domestique entretiennent des relations étroites entre eux.

Étant donné l'inexistence de mesures sur l'énergie solaire et du fait que cette énergie se borne simplement à fournir une chaleur suffisante pour sécher les récoltes à l'air libre pendant les saisons de séchage, il conviendrait d'entreprendre des études dans les domaines suivants : en premier lieu, des systèmes plus fiables de collecte de données sur le rayonnement solaire doivent être mis en service à divers endroits du pays, exploités par un personnel compétent et entretenus selon les règles. Les données obtenues sur une période de deux ou trois ans pourraient alors servir à mettre au point des méthodes fiables qui permettraient de prévoir les valeurs du rayonnement solaire au moment de concevoir des séchoirs. En deuxième lieu, il faudrait poursuivre les travaux sur le brûleur à sciure dans le séchoir hybride afin d'en améliorer l'efficacité et d'étendre la

gamme des déchets agricoles pouvant entrer dans le processus de combustion.

Pour comprendre le rendement et améliorer les procédés de conception des séchoirs solaires indirects à convection naturelle, il faudrait effectuer des recherches en laboratoire dans les domaines suivants :

- obtenir des données précises et détaillées sur la répartition des températures, de l'humidité relative et des pressions à divers endroits dans le séchoir;
- obtenir des données sur les courbes de séchage de diverses récoltes en utilisant l'épaisseur de la couche du produit comme paramètre variable;
- mettre au point des méthodes simples de conception de séchoirs à convection naturelle, en se basant sur une combinaison de données expérimentales et de modèles informatiques;
- mettre au point des séchoirs à l'aide de matériaux de construction locaux, comme la boue, l'argile, le fer galvanisé, la paille et les plastiques transparents;
- déterminer l'effet de l'emploi de matériaux de haute capacité thermique comme les briques de boue ou d'argile sur le rendement global du séchoir et
- accroître le débit d'air par l'emploi de cheminées de réchauffement, de générateurs de vortex et d'appareils mécaniques simples, en tenant compte du caractère particulier de leur emplacement.

Il n'y a aucune méthode de recherche concernant les essais de séchoirs solaires sur le terrain. Les ingénieurs et les socio-économistes doivent étudier les avantages de plusieurs méthodes qui pourraient servir à introduire les séchoirs. Voici quelques propositions :

- évaluer le succès des essais sur le terrain attribuable à la participation de fabricants éventuels, de vulgarisateurs et d'agriculteurs (dès les premières étapes);
- déterminer le niveau de participation des utilisateurs et de l'équipe de recherche dans l'exploitation des séchoirs et
- établir des méthodes convenables d'observation touchant l'adoption de certains séchoirs, en précisant le rôle de chaque personne et le moment de leur intervention.

Pour arriver à des résultats

La pénurie générale de ressources humaines et matérielles en Afrique indique qu'une collaboration s'impose entre les chercheurs. Il faudrait une meilleure coordination des recherches sur le séchage solaire de manière à maximiser l'emploi des ressources disponibles. On présente ci-dessous certaines propositions qui pourraient aider à promouvoir l'emploi des séchoirs solaires.

Réseau de projets sur le séchage

Il faudrait constituer en un réseau efficace le groupe actuel de projets sur le séchage. Les organismes comme le Commonwealth Science Council et le Centre de recherches pour le développement international pourraient être en mesure de jouer un rôle de premier plan dans la coordination des activités de ce réseau. Chaque chercheur devrait, selon sa spécialité, se concentrer sur un problème bien particulier. De cette façon, le dédoublement des efforts serait réduit à sa plus simple expression et les activités de recherche pourraient se compléter l'une l'autre.

Publication des résultats

Les conclusions des travaux sur le séchage ne sont habituellement pas diffusées à un large auditoire. Même lorsqu'elles le sont, il est souvent difficile d'évaluer la contribution de la recherche à cause du style de présentation, de la clarté de l'exposé ou du manque de renseignements. Les chercheurs qui travaillent sur des problèmes particuliers à l'Afrique devraient être encouragés à publier leurs conclusions pour leurs collègues par l'intermédiaire de communications efficaces. Un réseau de projets sur le séchage pourrait coordonner la diffusion de toute cette masse de renseignements utiles.

Conclusion

Nous avons tenté, dans cette communication, de présenter une évaluation critique des besoins, des conditions et du matériel relatifs au séchage solaire dans les régions rurales d'Afrique, en prenant comme exemples les études effectuées en Sierra Leone. Quatre conclusions peuvent être tirées de notre exercice :

- Une évaluation préliminaire des besoins s'impose avant de chercher à faire adopter sur une grande échelle les nouveaux systèmes de séchage.
- La recherche sur le séchage solaire doit se faire avec la participation des diverses disciplines en cause.
- On peut utiliser efficacement les séchoirs solaires à convection naturelle, mais il faudra effectuer beaucoup d'autres activités de R&D avant de mettre au point des systèmes appropriés. Les travaux futurs devront s'orienter vers la conception de séchoirs assistés par ordinateur et les expériences devront être suivies d'essais sur le terrain.
- Les études sur le séchage solaire en Sierra Leone ont donné des résultats qui ont permis de faire avancer les connaissances sur le fonctionnement des séchoirs solaires à convection naturelle.

Remerciements -- Les recherches dont il est question dans la présente communication ont été rendues possibles grâce à des subventions accordées par le Centre de recherches pour le développement international (Canada) ainsi que l'Organisation des Nations-Unies pour le développement industriel.

Bibliographie

- Ali, H.M., Sakr, I.A. 1982. Le séchage des légumes en Égypte. In Yaciuk, G., éd., Le séchage des produits alimentaires. Centre de recherches pour le développement international, Ottawa (Ontario), Canada. IDRC-195f, 15-19.
- Ba, A., Banzet, C., Degbe, J.M. 1982. Le séchage des oignons au Niger. In Yaciuk, G., éd., Le séchage des produits alimentaires. Centre de recherches pour le développement international, Ottawa (Ontario), Canada. IDRC-195f, 63-64.
- Bassey, M.W. 1982a. Influence of chimney configuration on temperatures in a solar dryer. In Proceedings of Energex 82 Conference, Regina, Canada. Vol. II/II, 862-867.
- 1982b. Potential use and performance of indirect free convective solar crop dryers in Sierra Leone -- Rapport final, Projet de recherche 3-P-78-0113 du CRDI. Department of Mechanical Engineering. University of Sierra Leone, Freetown, Sierra Leone.
- 1982c. L'énergie solaire comme source de chaleur pour le séchage des récoltes en Sierra Leone. In Yaciuk, G., Le séchage des produits alimentaires. Centre de recherches pour le développement international, Ottawa (Ontario), Canada. IDRC-195f, 77-85.
- 1983a. Characteristics of hole-through-sawdust type burners. International Journal of Ambient Energy, 4 (1), 39-46.
- 1983b. The use of sawdust for small-scale energy applications (Chapter 66). In Meyer, R.F., Olson, J.C., éd., The future of small energy resources. McGraw-Hill Publishers, New York, N.Y., É.-U.
- 1985a. Interaction between temperatures, airflow and chimney design in indirect free convective solar dryers. In Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius (Vol. II). Commonwealth Secretariat, Londres, R.-U.
- 1985b. Design and performance of a hybrid crop dryer using solar energy and sawdust. In compte rendu du colloque INTERSOL 85, Montréal, 22 au 28 juin 1985. International Solar Energy Society, Victoria, Australie.
- Bassey, M.W., Massaquoi, J.G., Sesay, J. 1978. A recommended formula for predicting total solar radiation in Sierra Leone. Paper presented at the 11th Biennial West African Science Association Conference, 13-18 March 1978, Lomé, Togo.
- Gomez, M.I. 1982. Les effets du séchage sur la valeur nutritive des produits alimentaires au Kenya. In Yaciuk, G., éd., Le séchage des produits alimentaires. Centre de recherches pour le développement international, Ottawa (Ontario) Canada. IDRC-195f, 31-35.

- Johnston, J.C. 1984. Solar crop drying in Zimbabwe. In Proceedings of the Solar Energy Society of Zimbabwe Conference: Making Use of Renewable Energy, Harare, Zimbabwe. Professional Conferences, Zimbabwe PVT Ltd., Harare, Zimbabwe, p. 62-65.
- N'Jai, A.E. 1985. Report of tests on use of solar-tents for fish drying in the Gambia. In Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius (Vol. II). Commonwealth Secretariat, Londres, R.-U.
- Okoh, I.K.A. 1985. Solar drying of timber in Liberia: Determination of the efficiency of an experimental solar dryer based on temperature measurements. In Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius (Vol. II). Commonwealth Secretariat, Londres, R.-U.
- Oosthuizen, P.H., Preston, E.G.A., Basse, M. 1985. Numerical simulation of a natural convection solar rice dryer. In Proceedings of the 7th Miami International Conference on Alternative Energy Sources, Miami, Florida, 9-11 December 1985, p. 505-508.
- Othieno, M.W. 1985. Optimization of solar air heating collectors used for crop drying. In Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius (Vol. II). Commonwealth Secretariat, Londres, R.-U.
- Sebbowa, F.B. 1985. Design considerations and prototype tests on a pyrethrum flow solar energy dryer. In Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius (Vol. II). Commonwealth Secretariat, Londres, R.-U.
- Whitfield, M.J.C.C. 1985a. Improving mass flow rates in free convective dryers. In Proceedings of the International Conference on Research and Development of Renewable Energy Technologies in Africa, Mauritius (Vol. II). Commonwealth Secretariat, Londres, R.-U.
- 1985b. Limiting performance and potential of free convective solar crop dryers in Sierra Leone -- Rapport provisoire, projet de recherche 3-P-83-0107 du CRDI. Department of Mechanical Engineering, University of Sierra Leone, Freetown, Sierra Leone.

MODÈLE NUMÉRIQUE D'UN SÉCHOIR SOLAIRE DE CÉRÉALES PAR CONVECTION NATURELLE : MISE AU POINT ET VALIDATION

P.H. Oosthuizen¹

Résumé — La présente étude vise à mettre au point un modèle informatique simple, mais fiable, de séchoir solaire de céréales à convection naturelle, à valider ce modèle dans la mesure du possible à l'aide des expériences menées actuellement sur les séchoirs solaires de riz et enfin à effectuer une série d'expériences en laboratoire pouvant aider à améliorer le modèle informatique. Ce modèle repose sur l'hypothèse voulant que toutes les petites pertes de pression soient négligeables lorsqu'on les compare à la chute de pression qui survient dans la couche de riz : ainsi, l'effet net de thermosiphon contrebalance tout juste la chute de pression dans la couche de riz. On suppose également que l'air qui sort de la couche de riz est soit saturé d'eau, soit à une température égale à la température initiale du riz et, qu'en conséquence, les forces de thermosiphon sont toutes réellement en jeu sous la couche de riz. Les résultats d'expériences dont nous disposons ont permis de valider le modèle et on a observé une concordance satisfaisante entre les expériences et les prévisions. On a effectué certains calculs informatiques pour connaître les répercussions de la taille du séchoir sur son rendement. Enfin, on décrit l'appareil et les instruments qui serviront à étudier en laboratoire le rendement du séchoir.

Introduction

Dans bon nombre de pays, le séchage du riz s'effectue encore en l'étalant sur une surface dure reposant sur le sol, mais il est de plus en plus reconnu qu'on pourrait réduire énormément les pertes pendant le séchage en remplaçant cette méthode par un système de séchage solaire indirect à convection naturelle. Dans un séchoir typique de ce genre (fig. 1), la couche de riz se trouve dans une chambre de séchage et l'air, qui est réchauffé dans un capteur solaire plan, est aspiré dans cette chambre grâce à l'effet de thermosiphon engendré par l'écart de température. On a essayé maintes fois de mettre au point ce genre de séchoir solaire à convection naturelle pour le riz (voir, par exemple, Bassey, 1982; Whitfield, 1985; Yu Wai Man et Wong Too Yeun, 1984), mais les résultats obtenus n'ont en général pas été satisfaisants. Une des raisons est que les études antérieures reposaient généralement en grande partie sur des méthodes purement expérimentales et qu'il n'y avait aucune évaluation théorique

1. Department of Mechanical Engineering, Queen's University, Kingston (Ontario), Canada.

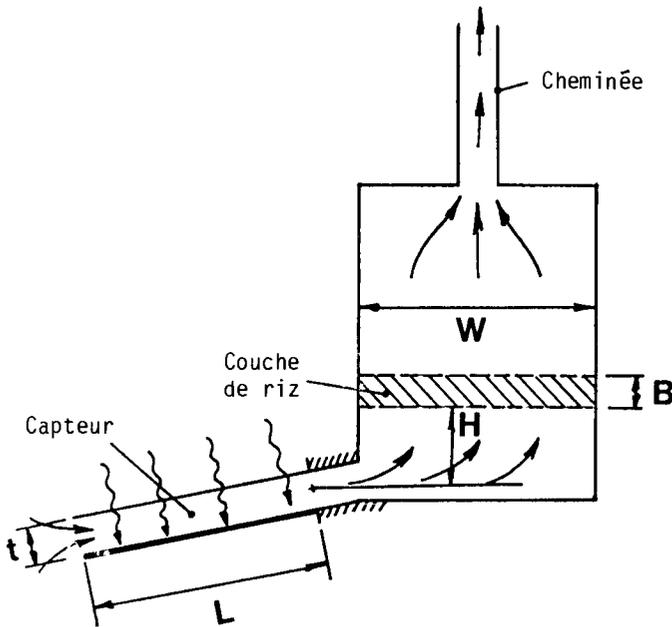


Fig. 1. Type de séchoir étudié.

poussée de la conception avant la construction même du séchoir. Cette façon de procéder empêche de déduire des résultats une méthode claire pour améliorer le rendement du séchoir. On peut aussi expliquer le faible rendement continu de ces séchoirs par le fait que les essais ont souvent eu lieu dans un environnement relativement non contrôlé, de sorte que l'on n'a pu établir clairement les raisons du phénomène à partir des résultats.

Pour favoriser la conception de meilleurs séchoirs solaires pour le riz, nous nous sommes efforcés dans la présente étude :

- de mettre au point un modèle simple mais précis de séchoirs solaires indirects à convection naturelle qui pourrait servir à élaborer des systèmes de séchage plus efficaces;
- de valider le modèle, dans la mesure du possible, à l'aide des résultats d'expériences disponibles obtenus avec des séchoirs solaires de riz à convection naturelle;
- d'entreprendre une série d'études contrôlées en laboratoire sur les caractéristiques de base d'un séchoir de céréales à convection naturelle et d'utiliser ces résultats pour améliorer le modèle numérique et
- d'utiliser le modèle numérique final pour concevoir et améliorer le séchoir solaire indirect de riz.

Nous avons reconnu qu'il était essentiel, pour améliorer le rendement du séchoir, d'effectuer à la fois des études numériques et des expériences hautement contrôlées qui s'appuieraient mutuellement.

La présente communication s'attache principalement aux deux premiers points de la liste ci-avant. La méthode de base utilisée dans l'étude expérimentale fait l'objet d'une description et nous abordons brièvement quelques améliorations possibles au modèle du séchoir. Bien que notre domaine principal soit le séchage du riz, le modèle informatique peut aussi s'appliquer au séchage d'autres cultures semblables, sous réserve de modifications mineures.

Équations du modèle

Le modèle informatique se compose de deux sections de base. La première détermine l'insolation solaire et la seconde calcule le rendement du séchoir lorsqu'il est soumis à cette insolation. Lorsqu'on examine l'application d'un séchoir donné dans une région géographique particulière, la section I du modèle générera des valeurs d'insolation correspondant à la région géographique en question. Par contre, si l'on compare les résultats d'expériences et les conclusions du modèle, les valeurs d'insolation utilisées dans le programme correspondront aux valeurs réelles mesurées pendant les essais. Étant donné que notre communication touche principalement le deuxième problème, c'est-à-dire une comparaison entre les résultats d'expériences et les conclusions numériques, on suppose que l'insolation est une valeur connue. Si l'on s'attaque au premier genre de problème, les valeurs d'insolation d'un endroit géographique peuvent être déterminées à l'aide de la méthode décrite par Preston (1985). Le modèle décrit ici est sensiblement le même que celui qu'a décrit Oosthuizen (1986).

On a examiné un séchoir du type illustré à la figure 1. Lorsque l'air pénètre dans le capteur, l'accélération du fluide produit une chute de pression. Il y en a également une dans le capteur et dans la cheminée, à la sortie du capteur et tout le long de la couche de riz. Ces pertes de pression sont toutefois contrebalancées par l'effet de thermosiphon qui se produit dans le capteur et dans la chambre de séchage puisque l'air y est à une température plus élevée qu'à l'extérieur. Lorsqu'on examine l'ordre de grandeur de toutes les pertes, la chute de pression dans la couche de riz est la plus importante; ainsi, dans le modèle actuel, on suppose que toutes les autres pertes de pression sont négligeables lorsqu'on les compare à celle dans la couche de riz. Cela dit, il est évidemment nécessaire que l'effet net de thermosiphon contrebalance la chute de pression dans la couche de riz. On suppose dans le modèle actuel que la chute de pression dans cette couche (Δp) est proportionnelle à la vitesse de l'air dans la couche :

$$\Delta p = Ub/K \quad [1]$$

où

U = vitesse moyenne de l'air dans le séchoir;
 b = épaisseur de la couche de riz et
 K = coefficient de la chute de pression dans la couche

Parce que la chute de pression dans la couche de riz est de loin la plus importante dans le séchoir fonctionnant sous des conditions opérationnelles, il convient de souligner que les études expérimentales de séchoirs à vide ne donnent à peu près pas de renseignements sur le rendement réel des séchoirs.

On doit ensuite tenir compte de l'effet de thermosiphon. Celui-ci sera, bien sûr, proportionnel à la différence entre la température moyenne de l'air dans la partie du séchoir en question et la température de l'air ambiant. Comme on le verra plus tard, l'air à la sortie de la couche de riz a une température égale, voire légèrement supérieure, à celle de cette couche. Par conséquent, étant donné le faible écart de température entre la couche de riz et l'air ambiant, l'effet de thermosiphon créé par le mouvement de l'air au-dessus de la couche sera négligeable. Pour que cela se produise, il faut que les cheminées souvent installées sur les séchoirs de riz à convection naturelle n'aient à peu près aucun effet sur le rendement du séchoir à moins que l'apport en énergie solaire de cette cheminée soit appréciable. Du fait que les cheminées sont habituellement posées à la verticale, le réchauffement solaire de la cheminée sera habituellement peu important à moins que le séchoir soit utilisé loin de l'équateur. C'est également là une autre raison pour laquelle les études expérimentales sur des séchoirs à vide ou du riz séché ne donnent à peu près pas de renseignements sur le rendement réel des séchoirs puisque, dans ces conditions, tout l'air qui est contenu dans la chambre de séchage et dans la cheminée se trouve à une température plus élevée que l'air ambiant. On est donc porté à supposer que l'effet de thermosiphon se produit uniquement dans le capteur et dans la chambre de séchage sous la couche de riz. Dans le capteur, l'air passe de la température ambiante à celle observée à la sortie du capteur et l'effet de thermosiphon dans le capteur peut être déterminé de façon approximative à l'aide de la température moyenne dans le capteur. De la sorte, l'équation de l'effet net de thermosiphon (ENT) sera :

$$ENT = \beta g \rho (T_C - T_a) (L \sin \theta / 2 + H) \quad [2]$$

où

- β = coefficient approximatif d'expansion de l'air
- g = accélération par gravité
- ρ = viscosité cinématique de l'air
- T_C = température de l'air à la sortie du capteur
- T_a = température de l'air ambiant
- L = longueur du capteur
- θ = angle d'inclinaison du capteur
- H = distance verticale de la couche de riz et la sortie du capteur

À la lumière des hypothèses posées ci-avant, cet effet de thermosiphon compense tout juste la chute de pression dans la couche de riz. Dès lors, la somme des équations 1 et 2 donne

$$U_b / K = \beta g \rho (T_C - T_a) (L \sin \theta / 2 + H) \quad [3]$$

Si nous envisageons qu'il y a équilibre énergétique dans le capteur solaire, le taux d'accroissement de l'enthalpie de l'air dans le capteur doit tout juste correspondre au taux d'apport d'énergie solaire :

$$\rho U_C W_C B_C C_p (T_C - T_a) = \eta q_1 W_C L \quad [4]$$

où

- U_C = vitesse moyenne de l'air dans le capteur

W_C = largeur du capteur
 B_C = hauteur de l'espace d'air dans le capteur
 c_p = chaleur spécifique de l'air
 η = efficacité du capteur
 q_I = insolation

On peut reformuler l'équation pour obtenir la hausse de température dans le capteur :

$$T_C - T_a = \eta q_I L / \rho U_C B_C c_p \quad [5]$$

Les vitesses moyennes dans le capteur et dans la chambre de séchage sont bien sûr liées par une continuité nécessaire de la masse d'air de sorte que

$$U = U_C (W_C B_C / W D) \quad [6]$$

où

W = largeur de la chambre de séchage
 D = longueur de la chambre de séchage

Les équations 4 et 5 renferment l'efficacité du capteur comme variable. Lorsqu'il s'agit d'un capteur conventionnel, cette efficacité, comme l'indiquent les manuels ordinaires (voir, par exemple, Sayigh, 1978), équivaut à peu près à

$$\eta = C_1 - C_2 (T_p - T_a) q_I \quad [7]$$

où

C_1 et C_2 sont les constantes, et
 T_p = température de la plaque du capteur

Étant donné qu'il doit y avoir équilibre entre le taux d'absorption de l'énergie solaire par la plaque du capteur et le taux d'échange thermique entre la plaque et l'air qui circule dans le capteur, il s'ensuit que

$$\eta q_I W_C L = h W_C L (T_p - T_a) \quad [8]$$

où

h = coefficient d'échange thermique entre la plaque du capteur et l'air

Il convient de souligner que le coefficient effectif d'échange thermique (h) repose sur la superficie frontale du capteur. Dans le cas d'un capteur plan simple, ce coefficient sera égal au coefficient moyen d'échange thermique; toutefois, si l'on utilise des plaques de capteur plus complexes, il comprendra les effets de l'accroissement de la superficie d'échange thermique. Il faut aussi faire remarquer que h repose sur l'écart entre les températures de la plaque et de l'air ambiant. La somme des équations 7 et 8 donne

$$\eta = C_1 h / (C_2 + h) \quad [9]$$

Ainsi, l'efficacité du capteur à laquelle le séchoir fonctionne

dépendra de la valeur de h . Si h est très grand, son effet sur η sera petit mais, à des valeurs inférieures de h , η sera fortement dépendant de h devenant directement proportionnel à h à mesure que h tend vers zéro.

De façon générale, la valeur de h dépendra de la géométrie du capteur, de la vitesse moyenne de l'air dans le capteur et de l'effet de thermosiphon dans le capteur. Dans un séchoir à convection naturelle doté d'un capteur plan simple, si l'effet de thermosiphon sur l'écoulement dans le capteur est négligeable, l'écoulement dans le capteur aura tendance à être laminaire et à ressembler à celui de la couche limite; la théorie de la couche limite indique alors que h doit varier dans une mesure égale à la racine carrée du nombre de Reynolds basé sur la vitesse moyenne de l'air et la longueur du capteur. On a donc supposé que

$$h = h_0 (Re_L/5000)^{0,5} \quad [10]$$

où

h_0 = coefficient d'échange thermique qui existerait avec un nombre de Reynolds de 5000 et

$$Re_L = U_c L / \nu$$

Dès que l'on a spécifié les valeurs des constantes requises, ces équations suffisent à déterminer la vitesse induite dans le séchoir pour toute valeur d'insolation (q_I). On doit recourir à un procédé itératif parce que h dépend de la vitesse. Dans ce procédé, on donne une valeur à h et on calcule un débit. Cela permet de trouver Re_L et de déterminer une nouvelle valeur à h . On recommence tout le procédé jusqu'à ce qu'on atteigne la convergence.

Jusqu'ici, on a examiné la question de la production d'un courant d'air chaud pour sécher le riz. Étudions maintenant le processus même de séchage du riz. Lorsqu'on se reporte aux résultats expérimentaux et à un essai antérieur relativement infructueux dans lequel on avait tenté de poser en modèle le rendement d'un séchoir solaire de riz à convection naturelle (Oosthuizen et al., 1985; Preston, 1985), on constate qu'un modèle très simple du processus de séchage peut être adopté. Dans ce modèle, on suppose que toute l'eau qui doit être éliminée du riz est contenue dans le riz sous forme liquide et, par conséquent, que l'énergie thermique dans le courant d'air qui entre dans la couche de riz sert, essentiellement, à fournir l'énergie latente nécessaire à l'évaporation de l'eau dans le riz. Pour cette raison, la température dans la couche de riz ne fluctuera presque pas pendant le séchage et on pourra ainsi ignorer sa capacité thermique. Autre conséquence à cette hypothèse, la température de l'air à la sortie de la couche de riz sera égale ou légèrement supérieure à la température initiale de la couche de riz, laquelle se situera près de la température de l'air ambiant. C'est pour cela que nous délaissions l'effet de thermosiphon dans l'air au-dessus de la couche de riz.

Pour déterminer le taux de séchage, on doit d'abord examiner les procédés de séchage indiqués sur un graphique psychométrique (fig. 2). Si l'air à la sortie du capteur et à l'entrée de la chambre de séchage, et par conséquent à l'entrée de la couche de riz, est à la température indiquée par un point b , par exemple, le taux de séchage

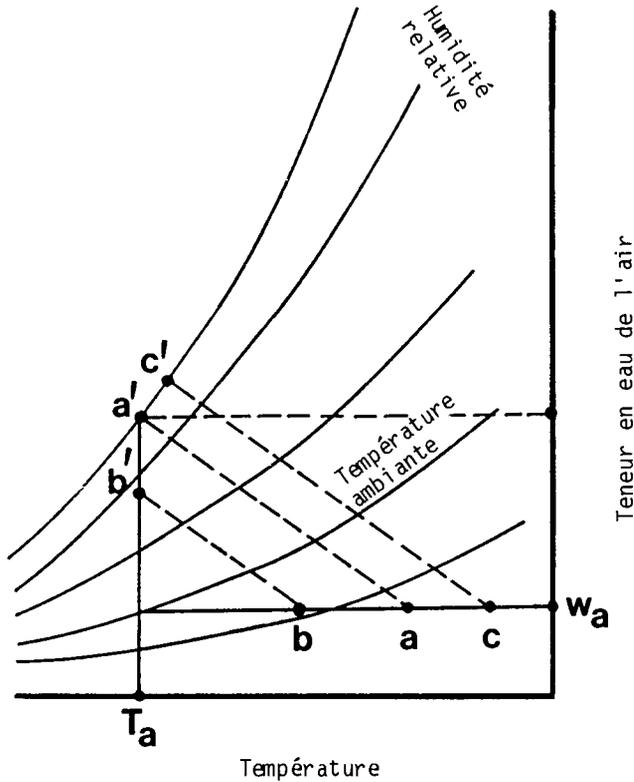


Fig. 2. Fluctuations possibles de température et d'humidité dans la couche de riz.

sera alors limité par la chaleur sensible disponible dans l'air d'entrée, c.-à-d. par le fait que l'air à la sortie de la couche de riz sera à la température de la couche de riz (comme l'indique le point b à la figure 2) et non entièrement saturé d'eau. Étant donné que la chaleur sensible disponible dans le courant d'air correspondra à l'énergie qu'elle obtient dans le capteur solaire, le taux de séchage dans ce cas sera déterminé par l'équation suivante

$$\eta q I W_{cL} = m_r (dM/dt) \ell \quad [11]$$

où

- m_r = masse du riz sec dans la couche
- M = teneur en eau du riz, base sèche
- t = temps, et
- ℓ = chaleur latente de l'eau

Le côté gauche de l'équation 11 représente évidemment le taux net auquel l'énergie solaire est absorbée par le capteur et transférée à l'air circulant dans le séchoir. Le côté droit représente le taux auquel la chaleur latente entre dans la couche de riz.

Cependant, si l'air à la sortie du capteur atteint un point c (fig. 2), par exemple, le taux de séchage sera limité par le fait que l'air à la sortie de la couche sera saturé (en d'autres mots, le point c' doit figurer sur la ligne d'humidité relative à 100 %). Dans ce cas, on détermine le taux de séchage en signalant que la balance énergétique pour le capteur correspond à

$$\eta q I W_{cL} = m c_p (T_c - T_a) \quad [12]$$

où

m = débit massique d'air dans le séchoir

alors que la balance énergétique pour la couche de riz exige que

$$m c_p (T_c - T_0) = m (w_0 - w_a) \ell \quad [13]$$

où

T_0 = température de l'air à la sortie de la couche de riz

w_0 = teneur en eau à la sortie de la couche de riz, et

w_a = teneur en eau à la température ambiante

Il est utile de récrire l'équation 13 comme suit

$$(c_p/\ell) [(T_c - T_a) - T_0 - T_a] = w_0 - w_a \quad [14]$$

Étant donné que la ligne de saturation sur le graphique psychrométrique définit w_0 comme une fonction de T_0 , les équations 12 et 14 permettent ensemble de calculer T_0 et w_0 pour n'importe quelle valeur d'insolation (qI). On obtient alors le taux de séchage en considérant que l'équilibre de la masse d'eau dans la couche de riz correspond à

$$m_r (dM/dt) = m (w_0 - w_a) \quad [15]$$

Dans la réalité, T_0 ne sera que légèrement supérieure à la température de la couche de riz.

Il est évident que ce modèle de séchage s'appliquera seulement dans la mesure où la teneur en eau dans la couche de riz demeure bien au-delà de la teneur en eau d'équilibre sous des conditions ambiantes. Dès que la teneur en eau diminue pour atteindre presque le seuil d'équilibre, le taux de diffusion de l'eau dans les grains de riz et d'autres considérations énergétiques commenceront à limiter le taux de séchage et il faudra alors adopter un modèle de séchage beaucoup plus complexe. Toutefois, vu que le séchage peut être considéré comme complet lorsqu'on a atteint le seuil d'équilibre dans la teneur en eau, cette limite n'est pas très grave. Dans l'application du modèle, ces équations servent jusqu'à ce que la teneur en eau (M) ait atteint une valeur égale au seuil d'équilibre sous des conditions ambiantes, et M est alors sensée demeurer à ce niveau constant.

Mise en oeuvre du modèle informatique

On a mis au point un modèle informatique reposant sur ces équations pour l'appliquer à un séchoir solaire de riz à convection

naturelle du type indiqué à la figure 1. Outre les dimensions du séchoir, il faut entrer dans ce programme les valeurs de l'humidité relative et de la température de l'air ambiant, le coefficient de perte de pression dans la couche (K), la densité du riz (ρ_r), les paramètres de rendement du capteur (C_1 , C_2 et h_0) ainsi que la fluctuation de l'insolation dans le temps (q_I). Comme on l'a vu précédemment, q_I pourrait être tiré des mesures obtenues pendant les expériences ou d'un modèle géographique du genre décrit par Preston (1985).

En appliquant le modèle, on a supposé les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} K &= 0,0005 \text{ m}^2/\text{Pa} \text{ par seconde} \\ \rho_r &= 600 \text{ kg/m}^3 \\ C_1 &= 0,56 \\ C_2 &= 4,31 \text{ W/m}^2 \text{ par } ^\circ\text{C} \\ h_0 &= 8 \text{ W/m}^2 \text{ par } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Les valeurs C_1 et C_2 sont typiques de celles qu'on a relevées au cours d'expériences sur des séchoirs simples équipés d'une couverture en vitre d'une qualité relativement mauvaise (voir p. ex., Sayigh, 1978). La valeur de h_0 se fonde principalement sur la valeur de l'écoulement laminaire dans la couche limite du capteur plan, mais également en partie sur l'effet généré par le thermosiphon et l'accélération fluidique dans le capteur. Ces deux effets ont tendance à augmenter le coefficient d'échange thermique de convection. Les valeurs de K et ρ_r utilisées proviennent de Excell (1980).

Dans le modèle réel, pour chaque heure à laquelle correspond une valeur q_I , on peut utiliser les équations de la section précédente pour obtenir le taux de séchage, dM/dt , à ce moment. La teneur en eau au moment Δt subséquent se calcule alors à l'aide d'une simple approximation aux différences finies; en d'autres mots,

$$M(t + \Delta t) = M_t + (dM/dt)_t \Delta t \quad [16]$$

Grâce à cette valeur de M, le processus se répète pour le moment suivant et ainsi de suite jusqu'à obtenir la fluctuation de la teneur en eau dans le temps. Comme on l'a mentionné précédemment, on emploie ce procédé jusqu'à ce que M ait atteint le seuil d'équilibre, c'est-à-dire environ 12 % dans notre cas, et M est alors sensée demeurer constante à cette valeur.

Validation du modèle

Avant de pouvoir utiliser le modèle informatique en toute confiance dans la conception d'un nouveau séchoir de riz, il faut bien sûr démontrer sa capacité de bien prévoir le rendement du séchoir; en d'autres mots, il faut valider le modèle. C'est ce qu'on a fait en comparant les résultats donnés par le modèle à ceux des études expérimentales sur des séchoirs chargés, comme le rapportent Bassey (1982) et Whitfield (1985). L'une des difficultés à effectuer cette comparaison venait du fait que, dans la communication de Bassey, la fluctuation de l'insolation dans le temps n'était que partiellement indiquée pour certaines des journées au cours desquelles ont eu lieu les essais et, dans la communication de Whitfield, bien qu'on ait donné quelques valeurs d'insolation pour toutes les journées pendant

lesquelles les essais ont été effectués, ces valeurs ne s'appliquaient qu'à une partie de chaque journée. Pour spécifier q_I , il a donc fallu supposer la forme de sa fluctuation pendant le jour. On a supposé qu'une période de séchage de 10 heures avait eu lieu tous les jours, c'est-à-dire qu'il y avait eu une insolation importante de 10 heures par jour. À l'aide de cette hypothèse et de toutes les autres mesures de q_I , on a pu dériver les fluctuations hypothétiques de l'insolation (fig. 3). Dans le cas des résultats d'essai donnés par Bassey, on a assumé la même fluctuation de l'insolation pour chaque journée pendant laquelle les essais ont eu lieu (ligne brisée à la figure 3). Toutefois, vu que Whitfield donnait des mesures beaucoup plus complètes de q_I , il a été possible de décrire des valeurs distinctes d'insolation pour chacune des journées de l'essai (ligne pleine à la figure 3).

Dans toutes les validations du modèle, on a supposé que la température de l'air ambiant affichait une valeur moyenne constante de 30°C, que l'humidité relative s'établissait à 50 % et que la température de la couche de riz était égale à cette température moyenne de l'air ambiant. Dans chaque cas, on a calculé la teneur initiale en eau du riz à partir des résultats d'expériences. On n'a pas tenu compte de la réhumidification du riz pendant la nuit.

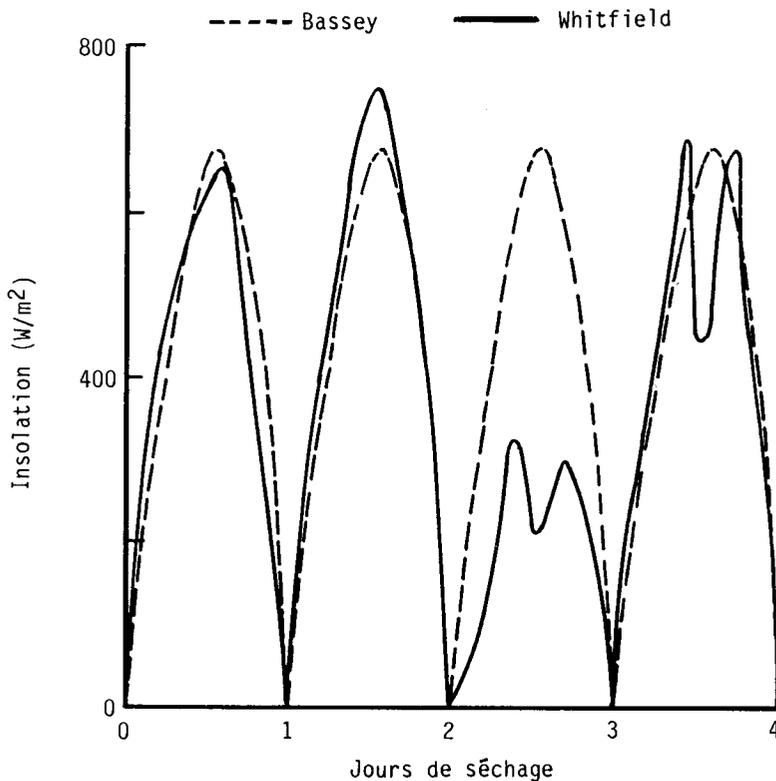


Fig. 3. Fluctuation quotidienne hypothétique de l'insolation d'après les données fournies par Bassey (1982) et Whitfield (1985).

À l'aide de ces hypothèses, on a utilisé le modèle informatique pour prévoir les fluctuations de la teneur en eau dans le temps pour les quatre essais sur le séchoir chargé, dont les résultats sont donnés par Bassey (1982), et pour l'unique essai sur séchoir chargé, dont les résultats paraissent dans Whitfield (1985). La comparaison entre ces fluctuations prévues et les mesures est donnée aux figures 4 à 7 (les résultats complets sont exposés ailleurs; voir Oosthuizen, 1986).

Lors de l'évaluation de l'écart entre les résultats expérimentaux et les prévisions, il semble que le calcul de la teneur en eau pendant les études expérimentales a quelque fois posé des problèmes. On ne peut cependant déterminer si ces problèmes proviennent de la méthode d'échantillonnage utilisée, comme l'ont indiqué Bassey et al. (dans ce volume), de la méthode utilisée pour stocker les échantillons avant d'en établir la teneur en eau ou de la méthode ayant servi à déterminer la teneur en eau. Toutefois, les très faibles teneurs en eau que l'on observait périodiquement pendant les études expérimentales, dont quelques-unes approchaient le seuil d'équilibre, sont évidemment erronées. Si l'on ne tient pas compte de ces facteurs, on constate une assez bonne concordance entre le modèle et les résultats expérimentaux. Ainsi, bien qu'il soit nécessaire de pouvoir compter sur les conclusions d'expériences beaucoup plus rigoureuses pour perfectionner le modèle, ce dernier semble capable, même dans sa forme actuelle, d'indiquer certaines améliorations qui pourraient être apportées à la configuration actuelle des séchoirs.

Conception améliorée des séchoirs

L'évaluation des résultats obtenus pendant la validation du modèle laisse fortement croire que les plus importants facteurs limitant le rendement des séchoirs actuels étaient :

- la taille du capteur, et
- la distance verticale séparant la couche de riz de la sortie d'air du capteur.

Les séchoirs utilisés dans les études expérimentales décrites par Bassey (1982) et Whitfield (1985) comportaient essentiellement un capteur de 0,7 m x 0,7 m dont la plaque absorbante se trouvait à environ 40 mm de la couverture vitrée, et d'une chambre de séchage d'environ 0,9 m x 0,9 m de section dans laquelle la couche de riz se trouvait approximativement à 0,12 m au-dessus de la plaque du capteur.

Pour évaluer les effets de la modification des deux paramètres mentionnés ci-avant sur le rendement du séchoir, on a fait des calculs pour les valeurs fixes suivantes : section de la chambre de séchage, 1 m x 1 m; espace dans le capteur, 40 mm; épaisseur de la couche de riz, 75 mm (environ 45 kg de riz); température ambiante, 30°C; humidité relative ambiante, 50 %; et teneur initiale en eau, 25 %. Les valeurs d'insolation étaient les mêmes que celles paraissant à la figure 3 pour Bassey (1982). On a supposé que la longueur et la largeur du capteur étaient les mêmes dans tous les cas. Pour des raisons que nous expliquerons plus tard, on a établi à 1 m la distance verticale séparant la couche de riz de la sortie d'air du capteur.

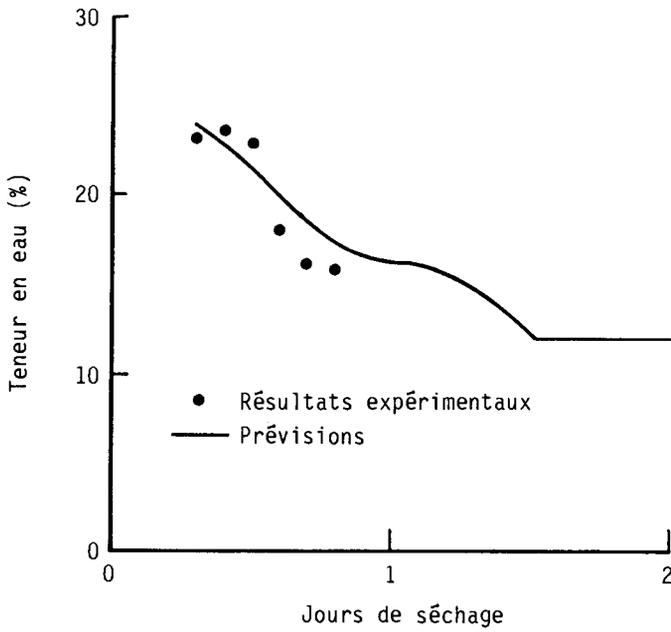


Fig. 4. Comparaison des prévisions et des résultats expérimentaux (Bassey, 1982) pour une couche de riz de 25 mm.

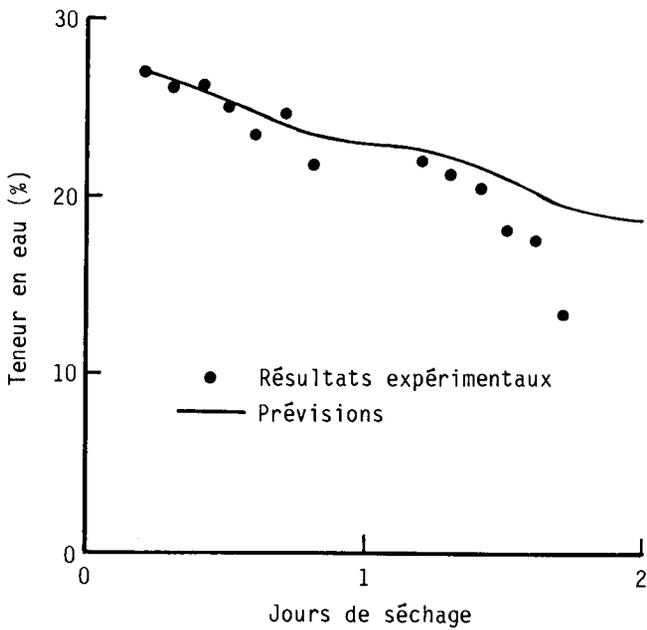


Fig. 5. Comparaison des prévisions et des résultats expérimentaux (Bassey, 1982) pour une couche de riz de 50 mm.

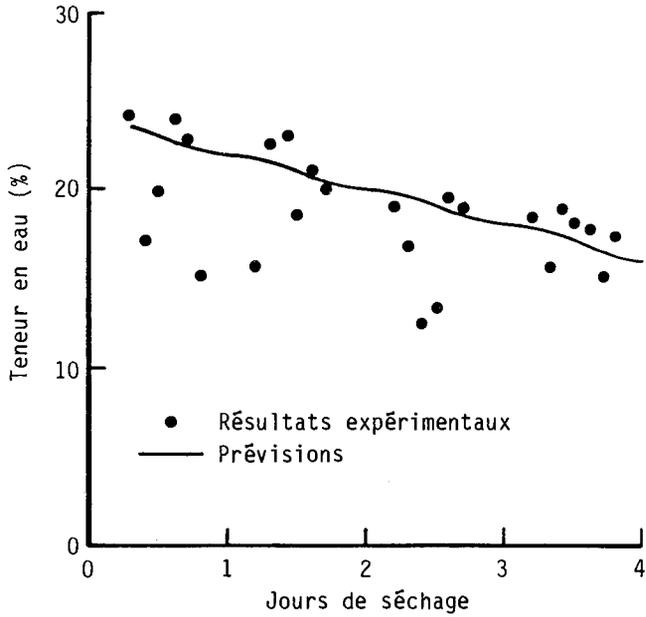


Fig. 6. Comparaison des prévisions et des résultats expérimentaux (Bassey, 1982) pour une couche de riz de 100 mm.

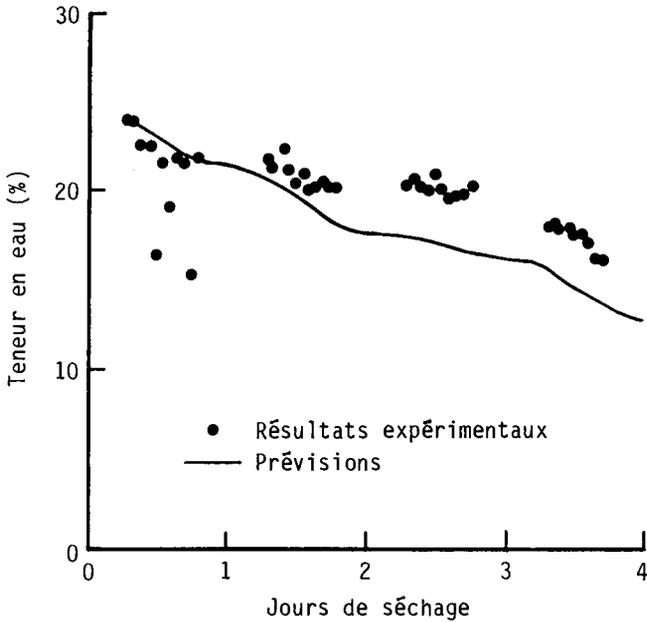


Fig. 7. Comparaison des prévisions et des résultats expérimentaux (Whitfield, 1985).

Comme il fallait s'y attendre, le rendement du séchoir s'est grandement amélioré à mesure qu'augmentait la taille du capteur (fig. 8) et, avec un capteur de 1 m x 1 m, un séchage complet s'effectue en un peu plus de deux jours, ce qui est satisfaisant pour la plupart des applications. Ces calculs et d'autres indiquent, de façon très approximative, que la surface du capteur doit correspondre à celle de la couche de riz.

On a aussi constaté que le rendement du séchoir s'améliorait de façon notable lorsqu'on augmentait la distance verticale entre la couche de riz et la sortie du capteur (H), ce dernier mesurant 1 m x 1 m (fig. 9); toutefois, lorsque H dépassait 1 m, le rendement ne s'accroissait presque plus.

En conclusion, donc, pour des séchoirs dont l'épaisseur de la couche de riz ne dépasse pas 100 mm, on propose, comme guide préliminaire de conception, que :

- la surface du capteur soit égale à la surface de la couche de riz;
- la couche de riz soit placée à 1 m au-dessus de la sortie du capteur et
- aucune cheminée ne soit placée sur le séchoir.

Étude expérimentale

Bien que les résultats du modèle informatique correspondent assez bien à ceux des études expérimentales, il y a quand même des différences importantes qui peuvent s'expliquer par des lacunes dans le modèle. Si elles existent, on soupçonne que ces lacunes proviennent très probablement d'erreurs dans le calcul du coefficient hypothétique d'échange thermique du capteur, ou encore à des imperfections dans le modèle utilisé pour le séchage du riz.

Pour savoir si ces aspects du modèle nécessitent réellement des correctifs, on a entrepris une série d'expériences contrôlées en laboratoire sur un modèle d'un séchoir solaire typique à convection naturelle pour le riz mais avec un capteur solaire simulé. Le simulateur était une tôle d'aluminium sous laquelle se trouvait une série de réchauffeurs électriques (fig. 10). Les mesures suivantes ont été prises pendant l'essai avec les instruments indiqués :

- la température moyenne de la plaque du capteur a été mesurée à l'aide de thermocouples en cuivre-constantan fixés au dos de la plaque;
- la température de l'air avant et après son passage dans la couche de riz a été mesurée à l'aide de sondes de thermocouples placées dans le courant d'air;
- la chute de pression dans la couche de riz a été mesurée à l'aide de transducteurs de pression fixés dans le mur du séchoir et reliés à un manomètre électronique de marque Barocel;

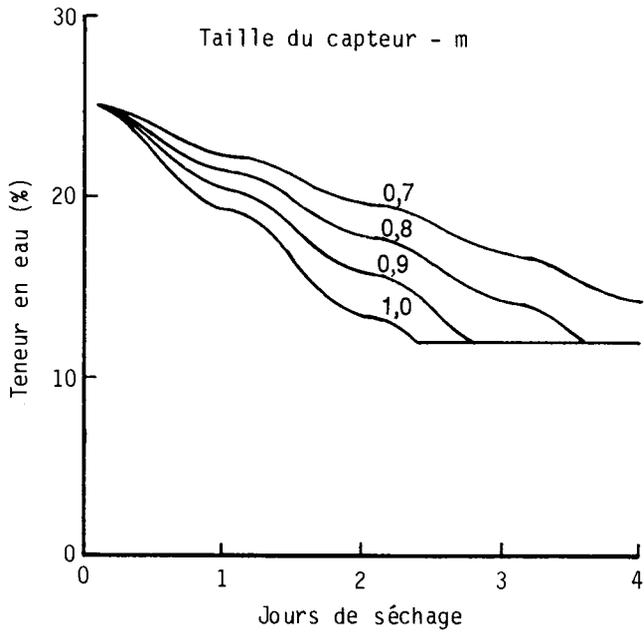


Fig. 8. Effet de la taille du capteur sur le rendement du séchoir.

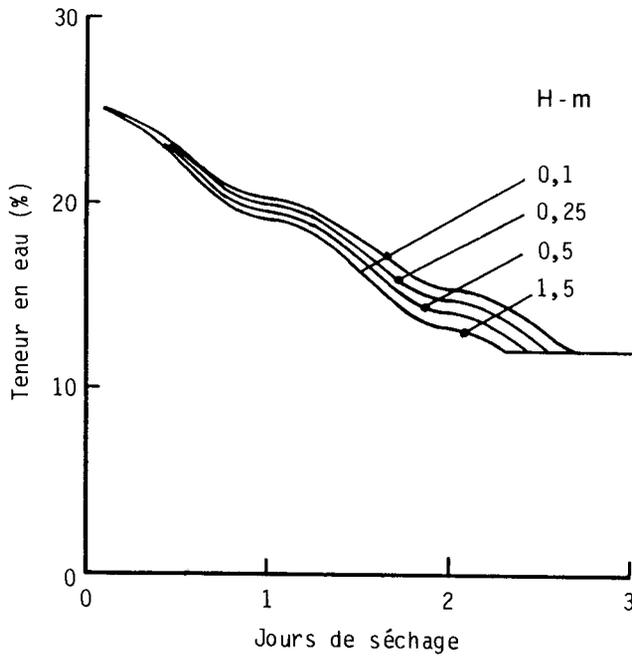


Fig. 9. Effet de la hauteur de la couche de riz sur le rendement du séchoir.

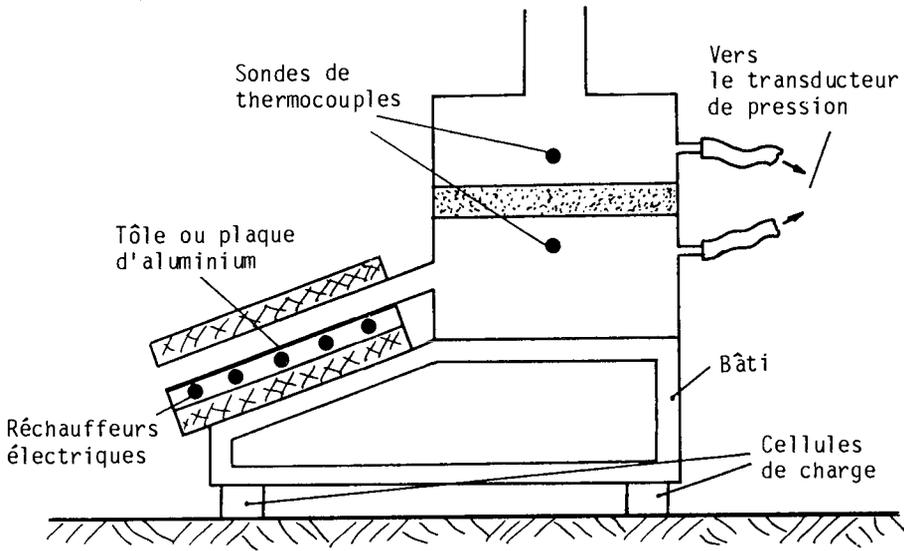


Fig. 10. Disposition de l'appareil expérimental.

- le poids du séchoir chargé de riz a été mesuré à l'aide de trois cellules de charge fixées sous le séchoir, et
- la température de l'air ambiant et l'humidité relative.

Les mesures étaient relevées automatiquement à l'aide d'un enregistreur de données Sciometric et d'un micro-ordinateur Zenith Z-150.

Nous étions d'avis que pour faire une comparaison utile entre le modèle numérique et les résultats d'expériences, il fallait connaître le coefficient (K) de chute de pression dans la couche de riz dans le séchoir. Pour cette raison, on a effectué des essais distincts en générant un courant d'air de débit connu dans une couche de riz d'une épaisseur prédéterminée. Ayant ainsi pu déterminer avec précision le coefficient K , on peut l'utiliser pour calculer le débit d'air dans le séchoir. Cette dernière valeur connue, on peut trouver un coefficient d'échange thermique du capteur en prenant la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur ainsi que la température moyenne de la tôle, de la façon suivante :

$$m c_p (T_c - T_a) = h A_p (T_p - T_a) \quad [17]$$

où

A_p = surface de la tôle du capteur.

En utilisant les fluctuations du poids total du séchoir dans le temps ainsi que la masse connue du riz sur une base sèche, on peut trouver les diverses valeurs de la teneur en eau du riz.

Conclusions

Les essais de validation du modèle nous ont permis d'arriver à cinq grandes conclusions. En premier lieu, la surface du capteur doit être égale à la surface de la couche de riz dans le séchoir; en deuxième lieu, la couche de produit dans le séchoir doit être placée environ à 1 m au-dessus de la sortie du capteur; en troisième lieu, les essais à vide dans le séchoir ne renseignent à peu près pas sur le rendement du séchoir; en quatrième lieu, une cheminée n'aura vraisemblablement pas beaucoup d'effet sur le rendement du séchoir et, en cinquième lieu, on peut mesurer automatiquement tous les paramètres de base du rendement du séchoir de riz en se servant d'un simple système constitué d'un enregistreur de données et d'un micro-ordinateur.

Remerciements -- Nous remercions de son aide le Centre de recherches pour le développement international du Canada.

Bibliographie

- Bassey, M.W. 1982. Potential use and performance of indirect free convective solar crop dryers in Sierra Leone -- Rapport final, Projet de recherche 3-P-78-0113 du CRDI. Department of Mechanical Engineering, University of Sierra Leone, Freetown, Sierra Leone.
- Excell, R.H.B. 1980. Basic design theory for a simple solar rice dryer. *Renewable Energy Review Journal*, (2), 1-14.
- Oosthuizen, P.H. 1986. A numerical study of the performance of natural convection solar rice dryers. Paper presented at the Fifth International Drying Symposium, Cambridge, Massachusetts, 13 au 15 août 1986.
- Oosthuizen, P.H., Preston, E.G.A., Bassey, M. 1985. Numerical simulation of a natural convection solar rice dryer. In *Proceedings of the 7th Miami International Conference on Alternative Energy Sources*, Miami, Florida, 9 au 11 décembre 1985, p. 505-508.
- Preston, E.G.A. 1985. Simulation of a natural convection solar rice dryer. Queen's University, Kingston, Ont., Canada. Thèse de M.Sc. (Génie).
- Sayigh, A.A.M. 1978. The technology of flat plate collectors. In Dixon, A.E., Leslie, J.D., éd., *Solar energy conversion -- an introductory course*. Pergamon Press, Toronto, Ont., Canada, p. 101-124.
- Whitfield, M.J.C.C. 1985. Limiting performance and potential of free convective solar crop dryers in Sierra Leone -- rapport provisoire, projet de recherche 3-P-83-0107 du CRDI. Department of Mechanical Engineering, University of Sierra Leone, Freetown, Sierra Leone.
- Yu Wai Man, Y.K.L., Wong Too Yeun, R.T.T. 1984. Solar crop drying. African Energy Programme, Commonwealth Science Council, Londres, R.-U. Technical Report.

Annexe

A_p	= surface de la plaque (ou tôle) du capteur
B_c	= hauteur de l'espace d'air dans le capteur
b	= épaisseur de la couche de riz
C	= constantes dans l'équation sur le capteur
c_p	= chaleur spécifique de l'air
g	= accélération gravitationnelle
H	= hauteur verticale séparant la couche de riz de la sortie du capteur
h	= coefficient d'échange thermique entre la plaque du capteur et l'air
h_0	= valeur de h à $Re_L = 5000$
K	= coefficient de chute de pression dans la couche
L	= longueur du capteur
l	= chaleur latente de l'eau
M	= teneur en eau du riz sur une base sèche
m_r	= masse du riz sec dans la couche
m	= débit massique d'air dans le séchoir
q_I	= insolation
Re_L	= $U_c L / \nu$
T_a	= température de l'air ambiant
T_c	= température de l'air à la sortie du capteur
T_p	= température de la plaque du capteur
T_o	= température de l'air à la sortie de la couche de riz
t	= temps
U	= vitesse moyenne de l'air dans le séchoir
U_c	= vitesse moyenne de l'air dans le capteur
W	= largeur de la chambre de séchage
w_c	= largeur du capteur
w_D	= longueur de la chambre de séchage
w_a	= teneur en eau sous des conditions ambiantes
w_o	= teneur en eau à la sortie de la couche de riz
β	= coefficient approximatif d'expansion de l'air
Δp	= chute de pression dans la couche de riz
η	= efficacité du capteur
θ	= angle d'inclinaison du capteur
ν	= viscosité cinématique de l'air
ρ	= densité de l'air
ρ_r	= densité du riz dans la couche

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.

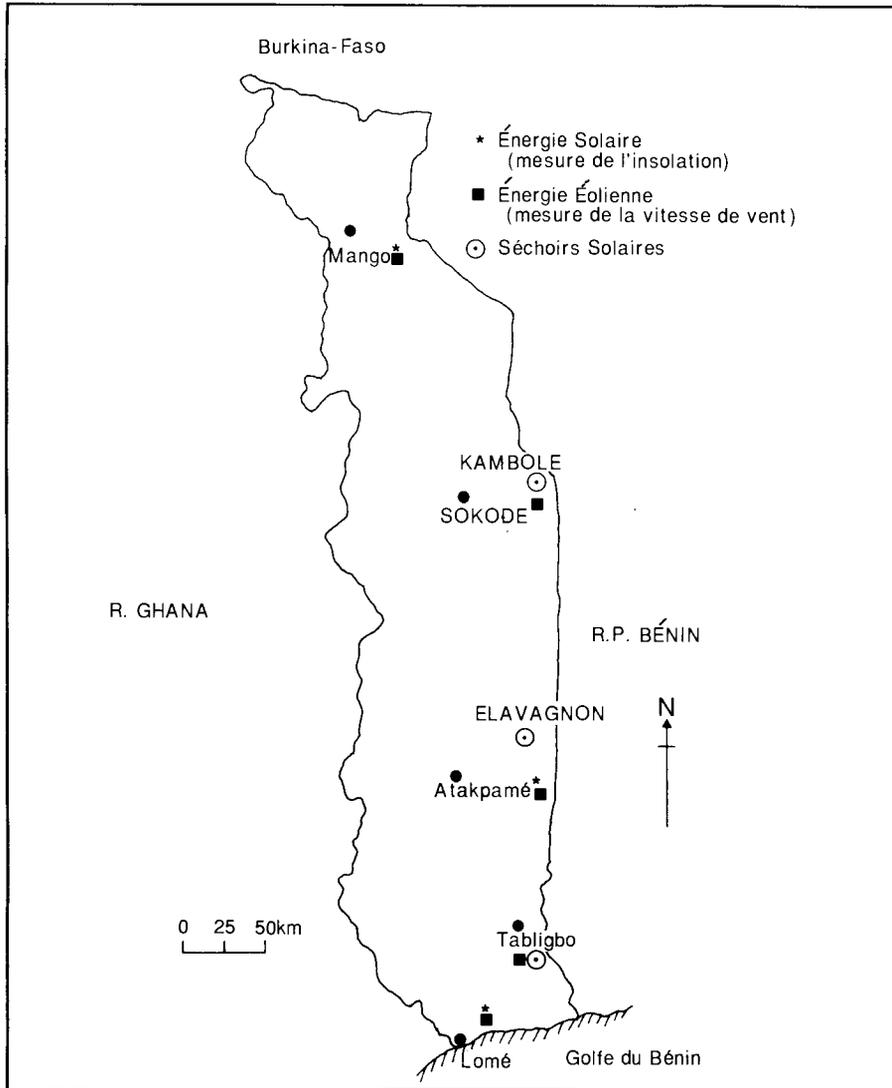


Fig. 1. Stations expérimentales au Togo.

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 :

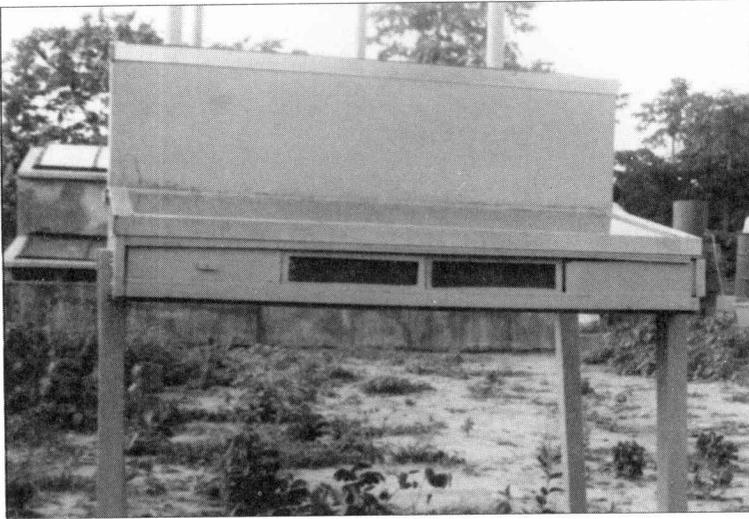


Fig. 2. Séchoir solaire en bois de type Brace (1980).

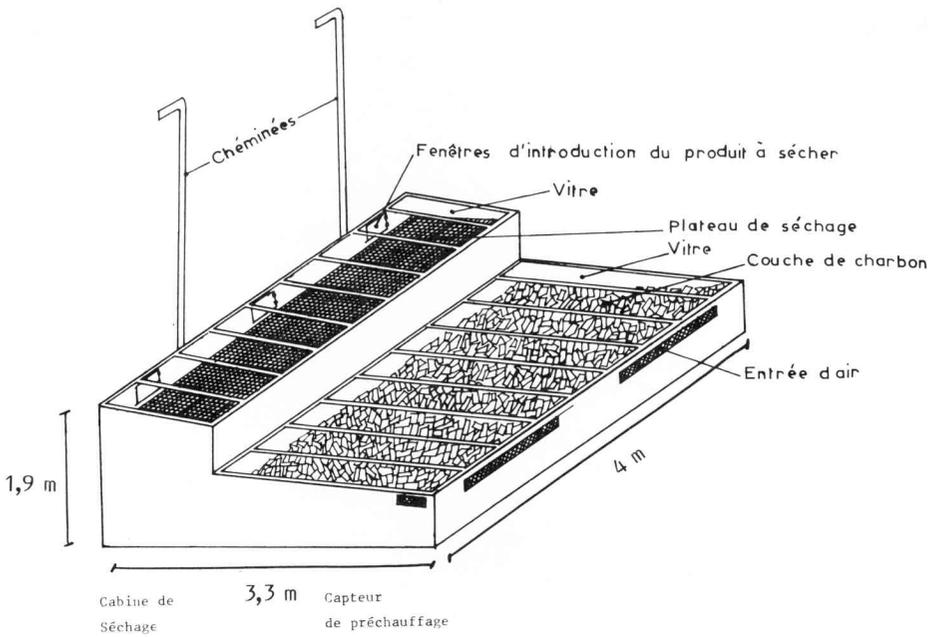


Fig. 3. Séchoir solaire en ciment d'une capacité de 80 à 100 kg (1981).

- 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

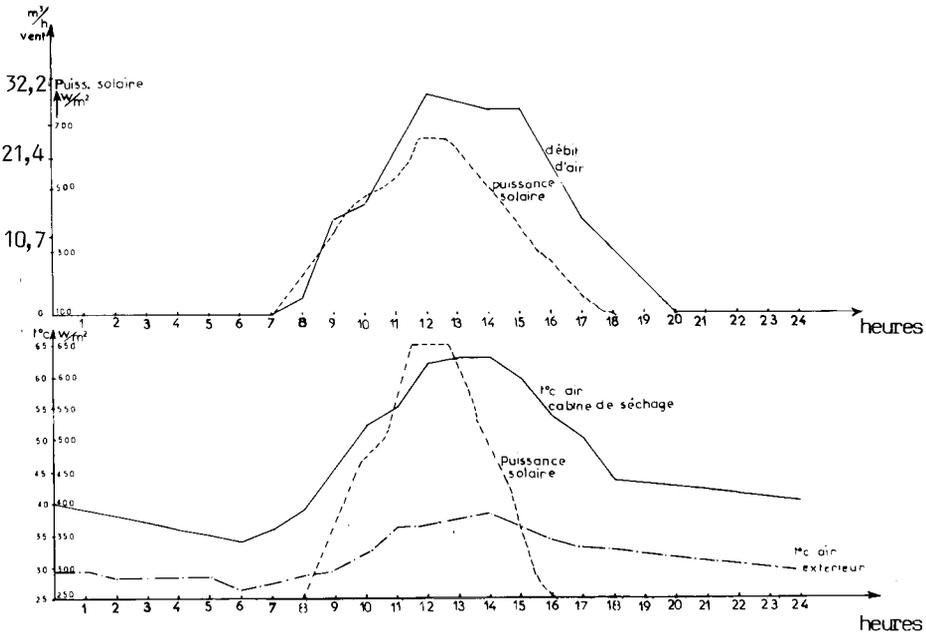


Fig. 4. Évolution du débit d'air, de la température dans la cabine de séchage et de la puissance solaire en fonction du temps (sècheir sans charge).

Le débit de l'air à l'intérieur de la cabine évolue donc graduellement de 2,6 m^3/h le matin à 31,2 m^3/h à midi pour revenir à 2,6 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.

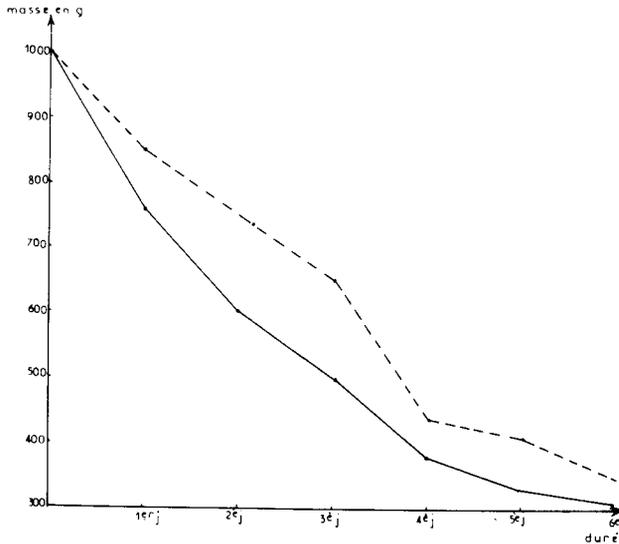


Fig. 5. Courbes de déshydratation du manioc. (Mesures prises à 17 h chaque jour : ----- air libre; — sècheur solaire.)

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

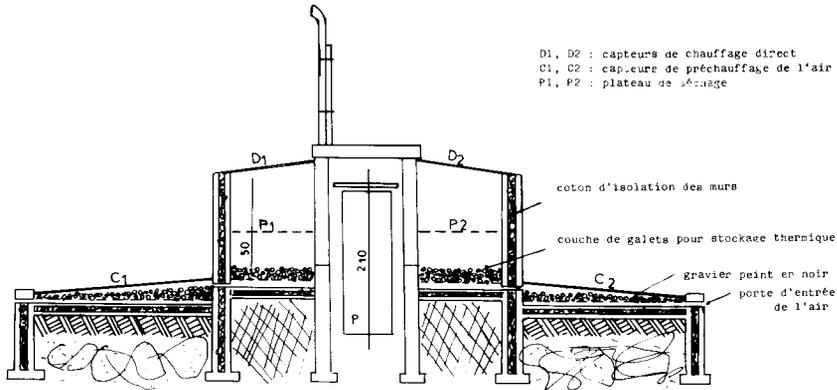


Fig. 6. Séchoir solaire -- 2 000 kg de céréales (maïs).

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

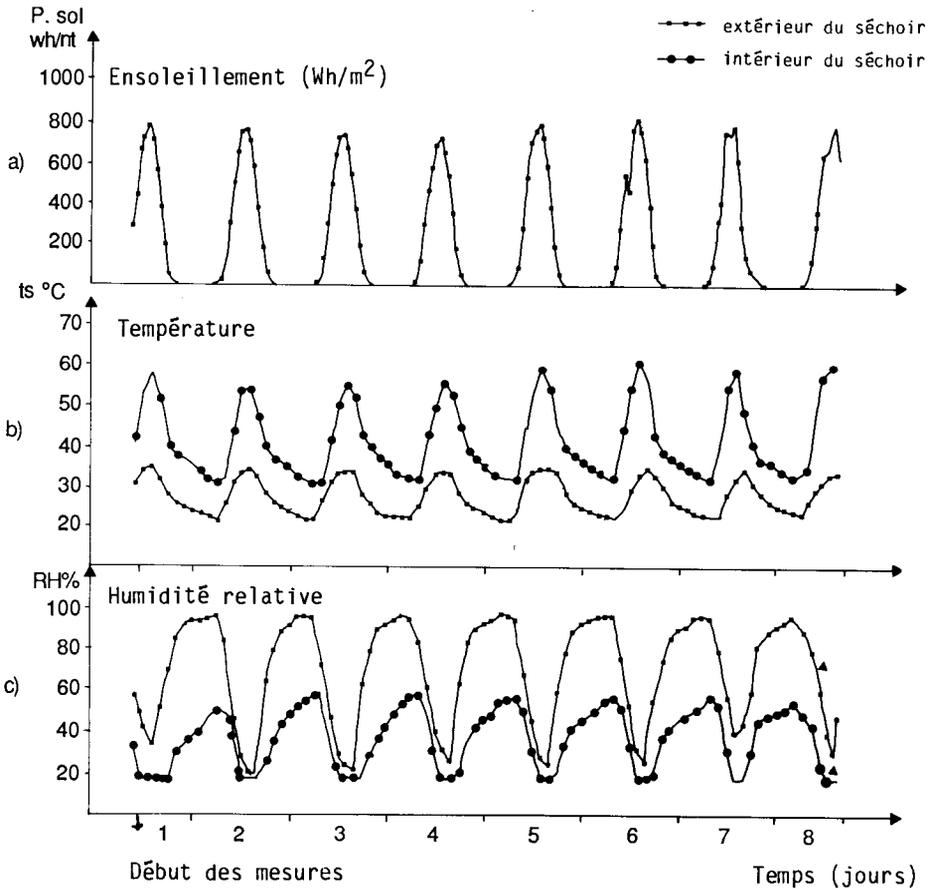


Fig. 7. Mesure du rendement physique (séchoir solaire sans charge d'une capacité de chargement de 2 000 kg).

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

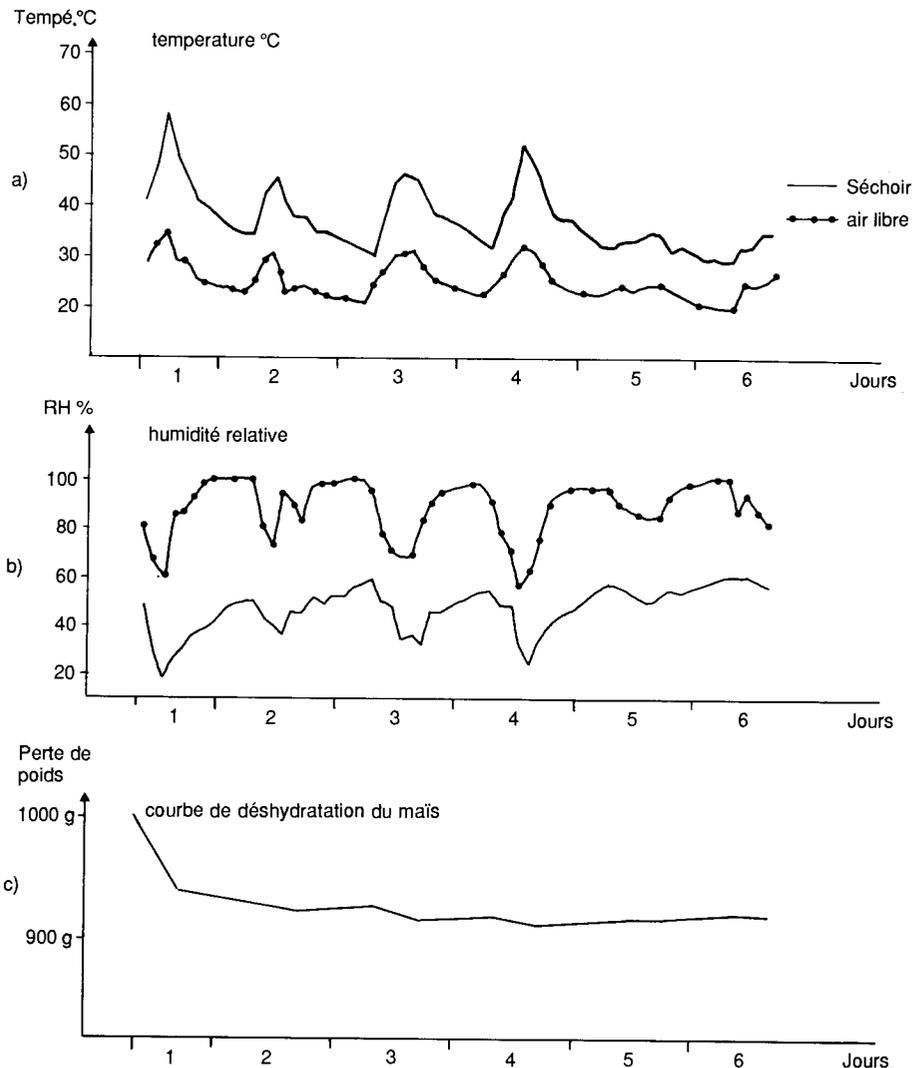


Fig. 8. Séchage du maïs-grain; séchoir solaire de Tabligo.

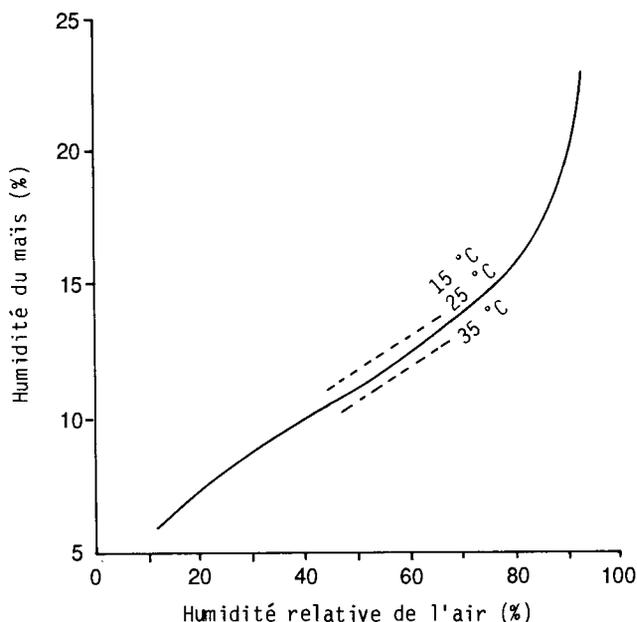


Fig. 9. Courbe d'équilibre d'humidité, Air-Maïs-Grains (établie à 25°C) (CEEMAT, 1974).

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 Tabligo (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-violetts 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.

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-Brobby¹

Résumé — Si les séchoirs solaires ont tellement retenu l'attention en Afrique pendant la décennie 1974-1984, c'est parce qu'ils pouvaient servir à résoudre deux des problèmes socio-économiques les plus urgents de ce continent : une crise de plus en plus prononcée attribuable à une production alimentaire insuffisante et à un accroissement rapide de la population et la grave récession économique amenée par l'augmentation rapide du prix des combustibles fossiles au cours de la même période. Cependant, étant donné que la mise au point des nouveaux séchoirs solaires découlait en grande partie des problèmes énergétiques éprouvés pendant les années 70, il convient de bien situer les questions fondamentales et la perception des solutions pertinentes dans le contexte des nouvelles options en matière d'approvisionnement d'énergie, surtout de source locale. On en est venu ainsi à penser que le problème de base de la recherche consistait à élaborer une meilleure technique énergétique qui résoudrait implicitement le problème des pertes post-récolte. Presque toutes les activités de R&D qui ont eu lieu ont été circonscrites et exécutées par des technologues, habituellement des ingénieurs. Leur principal objectif a été d'améliorer le rendement thermodynamique des séchoirs et, partant, d'accroître les choix énergétiques en régions rurales. On a pu mettre au point plusieurs conceptions techniquement supérieures au séchage traditionnel à l'air libre. Néanmoins, leur capacité de résoudre les problèmes de pertes reste encore à démontrer et, dans beaucoup de cas, les nouveaux séchoirs ne répondent pas aux besoins de la plupart des régions rurales d'Afrique. La présente communication aborde les questions et facteurs principaux dont on doit tenir compte dans la conceptualisation, la définition et l'exécution de projets de R&D sur des séchoirs solaires de récoltes en Afrique. Elle propose un cadre conceptuel permettant d'évaluer la pertinence, l'intérêt, la viabilité et la faisabilité techno-économique des projets afin d'en garantir la crédibilité scientifique et promotionnelle.

1. Commonwealth Science Council, Londres, Royaume-Uni. Les opinions émises n'engagent que la responsabilité de l'auteur et pas nécessairement celle du CSC.

Introduction

Le premier colloque sur l'énergie en Afrique (CEA) a eu lieu en mars 1985 et a principalement fait l'objet de communications exposant les résultats de nombreux projets de R&D sur de nouveaux séchoirs solaires en Afrique (CSC, 1986). Les communications ont fait la preuve que l'Afrique possédait la capacité technique de concevoir, mettre à l'essai et évaluer des méthodes techniquement supérieures de séchage de denrées alimentaires et de produits agricoles. Toutefois, il était aussi très clair que la plupart des travaux avaient été effectués en partant d'une mauvaise définition des problèmes de développement ou en ne leur accordant pas toute la place qu'ils méritaient. (En fait, cette idée était tellement répandue qu'elle a donné lieu à un atelier informel à bord d'un vol à destination de l'Afrique occidentale : ce qui est désolant, c'est que la discussion a peut-être eu lieu six ou sept heures trop tard.) Quoi qu'il en soit, notre communication, et de fait toute nouvelle étude sur le développement des séchoirs solaires en Afrique, vise essentiellement à fournir les réponses appropriées aux quatre questions suivantes.

- Quel est l'objectif principal du projet de recherche? Fournir de l'énergie, accroître l'approvisionnement du produit, ou les deux?
- Qui sont les bénéficiaires prévus? Des particuliers, des sociétés ou un groupe de bien-être bien défini?
- Quelles sont les options qui s'offrent pour répondre aux objectifs énoncés; en termes de coûts relatifs et d'efficacité des technologies et des sources d'approvisionnement d'énergie?
- Quelles doivent être les composantes d'un programme convenable de R&D pour assurer des conclusions valables et utiles à un projet?

Toutes ces questions sont abordées à la lumière de l'expérience acquise aux termes du Projet de séchage solaire des cultures (PSSC) du CEA, établi par le Commonwealth Science Council (CSC) en 1979 avec pour objectif bien défini (CSC, 1980) : "d'améliorer les méthodes traditionnelles de séchage des récoltes et des produits à l'air libre en Afrique par la mise au point et l'introduction de techniques de séchage solaire appropriées".

Définition du problème de recherche

Les objectifs particuliers du CEA-PSSC étaient "de concevoir, mettre au point et éprouver des séchoirs solaires pour des exploitations agricoles de petite et grande taille, y compris des coopératives". Bien qu'à caractère régional, chaque projet devait tenir compte des besoins spéciaux des pays participants individuels, à la fois sur le plan des produits cibles et des groupes d'utilisateurs. Ainsi, le problème à l'étude a été clairement défini comme une innovation technologique visant à atténuer les effets néfastes de la crise du pétrole. Ce qui n'était pas facilement apparent ni précisé de façon explicite étaient la nature et l'ampleur des problèmes des utilisateurs finals que les nouvelles technologies solutionneraient, ainsi que les coûts de cette solution par rapport à d'autres remèdes possibles. Il nous semblait aller de soi que toute nouvelle source d'énergie de remplacement était souhaitable et allait

vraisemblablement bénéficier à tous les utilisateurs finals étant donné la grave situation du marché des approvisionnements.

Avant de se lancer dans un projet de R&D sur le séchage solaire, il faut d'abord établir le besoin d'une technique de séchage des produits récoltés. Lorsqu'une telle technique existe déjà, que ce soit par la méthode traditionnelle de séchage à l'air libre ou à l'aide d'un appareil à combustible, ou les deux, on peut définir très clairement l'orientation principale de la recherche. Tous les projets du CEA appartenaient à cette catégorie (tableau 1). Toutefois, la définition de l'orientation de la recherche ne constitue pas en elle-même un indicateur fiable de l'importance relative et de la taille des problèmes à résoudre. Le procédé de séchage n'est qu'une étape dans les activités post-récolte qui, dans le cas des céréales, englobent la récolte, la manutention, le battage, le séchage, l'entreposage et le broyage.

Ainsi, l'une des premières tâches essentielles est d'établir l'importance relative du séchage dans le cycle post-récolte d'un produit donné. En d'autres mots, on doit pouvoir exprimer les pertes post-récolte sous forme d'indicateurs mesurables sur le plan économique, quantitatif, qualitatif et nutritif : on dispose alors d'un élément clé du processus de définition du problème qui amènera à

Tableau 1. Produits examinés dans les projets de séchage solaire du CEA.

Pays	Produits	Groupes cibles
Gambie	Riz, poisson	Petits agriculteurs, régions rurales
Ghana	Piments, croustilles de manioc, maïs, haricots, poisson	Petits agriculteurs, régions rurales
Kenya	Café, thé, pyrèthre, maïs	Petits agriculteurs commerciaux, coopératives rurales
Île Maurice	Cultures multiples	Petits agriculteurs
Tanzanie	Pyrèthre, poisson	Petits agriculteurs commerciaux, régions rurales
Ouganda	Maïs, fèves de soya, arachides, poisson, café	Agriculteurs commerciaux
Zimbabwe	Légumes saisonniers	Petits agriculteurs, régions rurales

Source : D'après les renseignements du CSC (1982).

établir les conditions limites du programme de recherche sur le séchage.

Bon nombre des questions importantes ont déjà été posées dans un guide récemment publié (CEC, 1985). Néanmoins, quelques-unes méritent d'être répétées ici à cause de leur pertinence :

- la quantité d'un produit obtenu au cours d'une campagne ou d'une période de récolte dans les régions cibles;
- la nature et le nombre de producteurs de chacun des produits en cause;
- l'estimation des pertes totales post-récolte, y compris celles attribuables au séchage;
- une évaluation de la suffisance des méthodes actuelles de séchage et des possibilités d'amélioration;
- les relations prix-débouchés du produit, y compris les fluctuations saisonnières, les répercussions de la valeur ajoutée par le séchage et la demande potentielle en vue d'un accroissement des productions et
- les coûts des méthodes actuelles de séchage par rapport aux niveaux de revenu et de dépenses des groupes cibles.

Pour le chercheur technique enthousiaste, les réponses à ces questions devraient contribuer à préciser les domaines les plus importants de l'innovation devant mener à une diminution des pertes post-récolte. Ainsi, bien que l'on dispose de peu de sources d'information sur la répartition des pertes entre les diverses cultures, une étude de la post-production du riz en Asie du Sud-Est (De Padua, 1974) présente la répartition, typique pour cette région (tableau 2).

Tableau 2. Estimations des pertes post-récolte de riz en Asie du Sud-Est d'après une récolte de 100 kg.

Étape	Perte en pourcentage	Poids du produit résiduel (kg)	Perte réelle de poids (kg)
Récolte	1-3	97-99	1-3
Manutention	2-7	90-97	2-9
Battage	2-6	85-95	2-12
Séchage	1-5	81-94	5-14
Entreposage	2-6	76-93	3-18
Broyage	2-10	68-90	3-25

Source : Chiffres adaptés de De Padua (1974).

Comme les pourcentages de perte aux diverses étapes s'accroissent, l'entreposage et le broyage posent sans doute le plus grand défi à une innovation technologique post-récolte, du moins en Asie du Sud-Est, le séchage arrivant en troisième place. Ce qu'il importe de souligner, c'est que même si la répartition des pertes de riz diffère en Afrique, on peut établir l'importance relative d'une technique améliorée de séchage en se basant sur les quatre indicateurs d'évaluation sans disposer des mêmes renseignements de base que ceux qu'a fournis De Padua (1974).

Bien sûr, lorsque le séchage représente une activité principale après la récolte, comme pour le cas du pyrèthre, il n'est peut-être pas nécessaire d'améliorer cette étape. Quoi qu'il en soit, il n'en reste pas moins important de connaître les données de base sur les pratiques actuelles de séchage afin de s'assurer que les améliorations recherchées ne trouveront pas meilleure réponse que par l'apport d'une nouvelle technique solaire. C'est sans doute aux politiques de récolte et d'achat en place à l'heure actuelle que l'on peut attribuer les plus fortes pertes. Par exemple, on pourrait diminuer radicalement les pertes post-récolte dans la production de pyrèthre si l'on décidait de centraliser les achats du produit humide, au lieu de s'adresser à des agriculteurs de subsistance, car ce produit serait alors séché dans des conditions hautement contrôlées. C'est d'ailleurs ce qui s'est passé en Tanzanie. Le problème des chercheurs consistait à trouver la meilleure façon de fournir l'énergie nécessaire au séchage contrôlé. Même dans ce cas, il n'en demeure pas moins important de définir le problème de séchage de manière à pouvoir évaluer les avantages (c.-à-d. la valeur ajoutée) d'une nouvelle méthode d'achat et à fixer le niveau d'acceptabilité des coûts de toute nouvelle technique de séchage proposée. En d'autres mots, si l'on peut ramener le problème à un choix entre plusieurs sources d'énergie, les coûts minimums cibles des sources de remplacement devront être ceux qui préserveront la valeur du produit séché. Cela revient à dire que si les coûts de l'option solaire sont de loin supérieurs à la valeur des produits "préservés", la solution offerte ne convient pas même s'il s'agit de la meilleure innovation technique ou scientifique.

Au coeur du processus de définition des problèmes de la recherche se trouve la question qui est implicite dans le titre de la présente communication, et chaque équipe de chercheurs doit établir la crédibilité d'une stratégie orientée sur l'amélioration des techniques de séchage solaire. La tâche peut être plus aisée dans certains cas que dans d'autres, par exemple chercher des solutions de rechange aux procédés mécanisés actuels d'approvisionnement d'énergie lorsque l'évaluation commerciale de leur viabilité est réduite à une compétitivité techno-économique des diverses options. Lorsque le cas n'est pas aussi évident, plus particulièrement dans les rapports avec les collectivités d'agriculteurs de subsistance dans un milieu économique informel, l'option de l'innovation technologique ne peut réellement être examinée qu'à la toute fin du processus de définition des problèmes de la recherche. En effet, la nécessité d'une telle approche prend une importance beaucoup plus grande à l'heure actuelle, depuis que la "crise du pétrole" a été maîtrisée, et on ne peut plus désormais assumer le rôle que l'on s'était donné d'ouvrir la voie à un nouvel avenir plus prometteur sur le plan de l'énergie.

Identification des bénéficiaires

Ce sont les problèmes de prix et d'approvisionnement des marchés en pétrole dans les années 70 qui ont donné l'élan nécessaire à toute cette masse de R&D sur les séchoirs solaires. Pour cette raison, les gouvernements de beaucoup de pays en développement, les organismes d'aide internationaux et les chercheurs ont posé comme unique hypothèse que toute activité qui avait pour but d'accroître ou de diversifier les choix en matière d'approvisionnement d'énergie profiterait à long terme au pays. Il n'était donc pas aussi nécessaire de justifier par des raisons économiques la mise au point de techniques faisant appel à des énergies renouvelables, puisque cela allait de soi. Il n'y avait qu'à élaborer rapidement des solutions techniques innovatrices pour effacer tous les problèmes à l'avenir.

Malgré l'infusion massive de ressources humaines, institutionnelles et financières dans les projets techniques, il était toujours clair, cependant, que chaque pays allait avoir, à la longue, à choisir la technique qui lui permettrait de réaliser au mieux ses objectifs socio-économiques en matière de développement, surtout lorsque plusieurs projets démontraient la possibilité de réduire la dépendance du pays à l'égard des importations d'énergie. Malheureusement, cette idée générale laissait également entendre que les pays exportateurs de pétrole n'avaient aucunement besoin d'approfondir les recherches sur les énergies renouvelables parce qu'ils disposaient déjà d'une base d'approvisionnement garanti en énergie.

Toutefois, sans tenir compte du climat dans lequel baignaient les activités de la R&D, le principal facteur dans le processus de décision de tout groupe cible devient l'organisation et l'utilisation optimums des ressources disponibles de manière à accomplir les objectifs fixés. C'est d'ailleurs la même démarche pour un pays, dont la préoccupation est le bien-être global du groupe, pour une entreprise commerciale ou pour un particulier qui désirent maximiser leur patrimoine, que ce soit sous forme de bénéfices ou d'une qualité de vie améliorée.

Les gouvernements qui appuient la R&D sur le séchage solaire peuvent avoir pour objectif de trouver de nouvelles sources d'énergie, habituellement locales, pour répondre à leurs besoins socio-économiques actuels et prévus, ou ce pourra être même dans l'idée altruiste de chercher à accroître la quantité et la qualité des approvisionnements alimentaires dans les régions rurales du pays. Quel que soit l'objectif, il devra être évalué dans le contexte de son utilisation optimum des ressources et, à cause des incertitudes qu'entraîne la quantification du bien-être du groupe, il est d'usage de procéder par l'intermédiaire de groupes cibles d'entreprises ou de particuliers plus facilement quantifiables. Même si la plupart des travaux de R&D recevront l'aide financière de l'État, il conviendra de bien définir le groupe cible : grandes exploitations agricoles commerciales, petits agriculteurs ruraux de subsistance et coopératives agricoles rurales (tableau 1).

Quelle que soit la composition du groupe cible, la liste suivante de questions influera sur l'attrait potentiel des séchoirs solaires :

- Le séchoir solaire augmentera-t-il la production du groupe cible

si les facteurs de production restent les mêmes, p. ex., diminuer les pertes post-récolte par un séchage plus efficace?

- Si l'on doit faire de nouveaux investissements pour obtenir des avantages accrus du séchoir solaire innovateur, ces avantages supplémentaires seront-ils supérieurs à l'investissement nécessaire, p. ex., y aura-t-il des débouchés pour écouler la quantité supplémentaire de produits obtenue à cause du nouveau séchoir?
- Si le groupe cible tire déjà des avantages optimums de ses activités actuelles, un investissement dans les séchoirs solaires lui sera-t-il plus avantageux en lui ouvrant de nouveaux marchés, p. ex., la nouvelle technique lui permettrait-elle d'augmenter la production primaire ou pourrait-elle même offrir de nouveaux débouchés comme l'utilisation par d'autres producteurs de la capacité excédentaire du séchoir?

À la base de toutes ces considérations, il faut bien convenir que les groupes cibles ne perçoivent pas nécessairement la valeur d'une technique de séchage solaire comme découlant nécessairement de son potentiel sur le plan des économies d'énergie ou de la substitution des importations. Cette perception se fonde avant tout sur les occasions d'accroissement de la richesse qu'elle fait miroiter. L'option d'approvisionnement d'énergie devient uniquement intéressante lorsque la nouvelle technique remplace directement une méthode moins rentable. Bien sûr, la mesure de rentabilité pourrait tenir compte des avantages accrus découlant d'un approvisionnement d'énergie garanti qu'offrirait l'option solaire. Ainsi, pour beaucoup d'agriculteurs commerciaux recourant déjà à une forme quelconque de technique de séchage mécanisée fonctionnant à l'aide d'un combustible, le caractère sécuritaire de l'approvisionnement en combustible, y compris la hausse des coûts, pourrait façonner leur propre perception d'une crise nationale de l'énergie.

En deux mots, les technologues doivent présenter des solutions intéressantes aux groupes cibles en se basant en grande partie sur les besoins de ces groupes. Il serait futile d'offrir des séchoirs mécaniques de dernier cri à des agriculteurs qui utilisent en grande partie le séchage à l'air libre à moins que les avantages potentiels de l'investissement demandé et de la technicité opérationnelle du séchoir ne ressortent déjà clairement. Parallèlement, il ne serait pas nécessaire d'effectuer une étude de faisabilité techno-économique très détaillée pour substituer un combustible à un autre dans une exploitation agricole commerciale. Dans ce cas, il n'y aurait besoin que d'évaluer tous les coûts et les avantages prévus et d'aller de l'avant seulement lorsque les avantages potentiels dépassent les coûts de l'investissement supplémentaire dans l'innovation technologique.

Le cas suivant illustre quelques-unes des grandes questions que nous venons de soulever.

Étude de cas

Un agriculteur rural exploitant une ferme de taille moyenne produit 500 kg de maïs par année qu'il met à sécher à une température de 27°C afin d'obtenir une teneur en eau de 13 % favorable à l'entreposage. Le maïs se négocie à 10 \$ le kg sur le marché alors

que le prix de détail du mazout s'établit à 2 \$ le litre et qu'il augmente de 10 % par année. (Nota : bien qu'on utilise le symbole du dollar, il pourrait s'agir de n'importe quelle devise). La consommation annuelle de combustible s'élève à 500 L. L'agriculteur possède un séchoir mécanique alimenté au mazout. Cependant, à cause de la forte hausse des prix et des approvisionnements de combustible de plus en plus incertains, l'agriculteur songe à acquérir des séchoirs solaires pour remplacer la technique de séchage qu'il emploie actuellement. On lui offre deux modèles : le premier est un séchoir à convection naturelle qui, pour un investissement de 10 000 \$, remplacera totalement le séchoir à mazout; le second, qui est un séchoir à convection forcée à piles photovoltaïques, coûte 50 000 \$ mais peut sécher jusqu'à 7 500 kg de maïs.

L'agriculteur a deux choix en ce qui concerne la capacité non utilisée du séchoir perfectionné :

- augmenter sa production annuelle à 7 500 kg à un coût supplémentaire de 5 000 \$ par année ou
- louer à d'autres producteurs la capacité excédentaire à raison de 3 \$ le kg.

Comme le plus simple des deux séchoirs est construit entièrement à partir de matériaux locaux, la Banque nationale de développement agricole peut lui consentir un prêt à un taux d'actualisation de 8 %, comparativement à un taux moyen de 10 % ailleurs au pays. Toutefois, comme il faut importer les modules du système à piles photovoltaïques, le taux d'actualisation du prêt s'élève à 15 %. Par contre, étant donné que le deuxième séchoir offre la possibilité d'accroître la production de céréales, ce qui réduirait le niveau actuel des importations, le ministère de l'Agriculture offre une subvention de 9 500 \$ par année à l'agriculteur s'il accroît sa propre production, et de 4 500 \$ par année s'il met son séchoir à la disposition d'autres agriculteurs. Les frais annuels d'exploitation et d'entretien totalisent 500 \$ dans le cas des séchoirs solaires conventionnels et à convection naturelle et à 1 500 \$ pour chacun des séchoirs à convection forcée.

La durée de vie économique du séchoir simple est de 12 ans (ce qui correspond à la durée de vie économique utile du système mécanique) alors que celle du système à piles photovoltaïques est de 15 ans. Tout le matériel n'aura aucune valeur résiduelle à la fin de sa durée de vie opérationnelle.

Laquelle des quatre options serait la plus avantageuse pour l'agriculteur ?

Solution

Pour tenir compte de la valeur temporelle de l'argent, qui est un facteur important lorsqu'on évalue la faisabilité d'un projet à long terme, on utilise la méthode de la valeur actualisée nette (VAN) pour actualiser tous les coûts et avantages prévus de chacune des années d'exploitation du projet. La méthode de VAN suppose un taux d'actualisation minimum souhaitable qui rend le projet acceptable. Tous les fonds autogénérés à venir sont actualisés à l'aide des taux

indiqués et le projet présentant la VAN la plus importante est choisi comme le plus attrayant (voir CSC, 1986, chapitre 19).

À l'aide des données financières et opérationnelles de base des quatre modèles de séchoir (tableau 3), on a déterminé la VAN des diverses options (tableau 4) selon les taux d'actualisation appropriés en se servant des facteurs d'actualisation paraissant dans les tables courantes.

L'évaluation révèle que le séchoir à piles photovoltaïques (séchoir solaire à convection forcée) destiné à accroître la production agricole générerait les bénéfices les plus importants (431 089 \$) même s'il nécessite aussi la plus forte mise de fonds en termes de matériel et de nouvelles installations de production. Au deuxième rang se classe le séchoir solaire à convection naturelle

Tableau 3. Données opérationnelles et financières relatives aux divers séchoirs.

	Types de séchoir			
	Conven- tionnel	À convection naturelle	À convection forcée	
			Production accrue	Capacité louée
Rendement en termes de produit (kg)	5 000	5 000	7 500	7 500
Ventes des produits (\$)	50 000	50 000	75 000	50 000
Stimulants annuels (\$)	--	--	9 500	4 500
Autre revenu (\$)	--	--	--	7 500
Coût en capital du matériel (\$)	--	10 000	50 000	50 000
Frais annuels d'explo- itation (\$)	500	500	1 500	1 500
Consommation de mazout (L)	500	--	--	--
Durée de vie du matériel (années)	12	12	15	15
Taux d'actualisation (%)	--	8	15	15
Taux annuel d'augmentation du prix du mazout (%)	10	--	--	--
Valeur résiduelle du matériel (\$)	0	0	0	0

Tableau 4. Valeurs actualisées nettes des diverses options.

Option	Valeur actualisée nette (\$)
Séchoir conventionnel	326 372
Séchoir solaire à convection naturelle	363 032
Séchoir solaire à convection forcée	
Production accrue	431 089
Capacité louée	328 762

Source : Annexe, tableaux 6 à 9.

(353 032 \$) qui vaut la peine d'être examiné si l'agriculteur ne peut obtenir le cautionnement nécessaire au prêt qu'il doit contracter. Le séchoir à convection forcée avec possibilité de location de la capacité excédentaire ne présente qu'un avantage marginal sur le séchoir conventionnel à mazout (328 762 \$ contre 326 372 \$). Il est donc douteux que l'agriculteur puisse être persuadé de convertir son séchoir à mazout en un séchoir solaire simplement sur l'hypothèse qu'une pénurie de mazout pourrait survenir à l'échelle nationale, surtout que les avantages découlant de l'investissement supplémentaire sont si peu importants lorsqu'on les compare aux coûts, aux risques et à la complexité technique d'une conversion.

À la longue, on doit pouvoir être en mesure d'exprimer toutes les priorités nationales sous forme d'avantages concrets pouvant se calculer en termes financiers de manière que les groupes ou particuliers cibles puissent faire leur choix d'après les gains qu'ils s'attendent de réaliser avec l'une ou l'autre des options. Il y a plusieurs points assez complexes à examiner dans une évaluation de ce genre, l'accroissement de l'efficacité technologique en matière d'énergie intervenant pour l'un d'eux. Il convient de bien définir et de bien comprendre le milieu social et économique dans lequel la technologie doit s'insérer afin de pouvoir établir l'utilité de chaque innovation technologique.

La R&D comme moyen de satisfaire les besoins perçus

Nous avons tenté de faire ressortir l'importance d'établir un cadre contextuel convenable pour circonscrire et résoudre les problèmes de séchage post-récolte éprouvés par les groupes d'utilisateurs cibles. La mise en place d'un programme de R&D bien défini et surtout la combinaison judicieuse des compétences humaines à chaque étape de l'exercice constituent la clé du succès. Jusqu'ici, ce sont les technologues qui ont été les plus motivés à lancer des études de R&D sur le séchage solaire des récoltes et on s'attend à ce qu'ils apportent une contribution importante aux solutions qui reposeront sur l'innovation technologique. Cependant, à moins que les technologues n'orientent leur compétence et leur talent vers des aspects particuliers de ce problème multiple, on est presque certain de se retrouver avec des techniques en quête de problèmes inexistantes ou mal posés.

Tableau 5. Cadre conceptuel d'un programme de R&D sur le séchage solaire des récoltes.

Étape	Fonction objective	Ingenieurs	Utilisateurs finals	Industriels	Economistes	Sociologues	Agronomes	Vulgarisateurs	Planificateurs	Biochimistes	Entrepreneurs	Spécialistes en science alimentaire
1	Enquêtes post-récolte	Ma	M	A	A	M	C	A				
2	Définition des groupes cibles	A	M	M	C	M	A	A	C			
3	Établissement des données repères sur les caractéristiques des récoltes et les paramètres du séchage	C	A				A			M		M
4	Conception et évaluation des techniques expérimentales	C	M	M	A	A		A				
5	Évaluation et essai sur le terrain des prototypes industriels	C	A	M	M	A		A				
6	Fabrication et diffusion des séchoirs industriels	A	M	C	A						M	

a C = chef d'équipe; M = membres clés de l'équipe, et A = autres membres de l'équipe.

Il est nécessaire d'incorporer les compétences possibles du technologue à celles de l'équipe multidisciplinaire et de déterminer le rôle principal de cette équipe à chaque étape du processus de R&D d'après les fonctions objectives particulières abordées à ce moment (tableau 5). Lorsqu'on met en place le cadre conceptuel d'un programme de R&D sur le séchage solaire, on doit faire correspondre les fonctions objectives de chaque étape à une équipe de chercheurs appropriée pour ensuite identifier les membres clés ou les compétences nécessaires à la tâche qui s'annonce.

Un tel cadre est presque assuré de soulever la critique et sera sans aucun doute soumis à un examen rigoureux tant au moment d'ordonnancer les étapes qu'à celui d'établir l'importance implicite des différentes compétences aux diverses étapes. Néanmoins, il faut essayer de le mettre en place, car c'est une condition préalable à l'établissement d'un programme de R&D sur le séchage solaire qui répondra aux besoins perçus des groupes cibles et, du même coup, offrira aux technologues le défi scientifique et le stimulant de l'innovation. Un programme qui repose sur le regroupement et l'utilisation optimum de compétences spécialisées à l'intérieur d'une équipe de chercheurs multidisciplinaire est la meilleure façon de s'assurer qu'il ne débouchera pas indirectement, situation malheureuse mais beaucoup trop fréquente, sur un séchoir présentant une supériorité technique et des innovations géniales, mais pour cela il faut que les groupes cibles modifient leurs besoins en conséquence ou que l'on ramène l'investissement nécessaire à la portée des groupes en question.

Remerciements -- Nous remercions de leur aide financière le Commonwealth Science Council et la British Overseas Development Administration.

Bibliographie

- CSC (Commonwealth Science Council). 1980. African Energy Programme Project Group Meeting, 20-26 September 1979, Anoha, Tanzania. CSC, Londres, R.-U. AEP Reports 1 and 2.
- _____ 1982. African Energy Programme Workshop on Solar Crop Drying. 11-13 October 1982, Nairobi, Kenya. CSC, Londres, R.-U. AEP Reports 8 and 9.
- _____ 1985. Solar dryers: Their role in post-harvest processing. CSC, Londres, R.-U.
- _____ 1986. Renewable energy development in Africa: Proceedings of the international conference on R&D for renewable energy technologies in Africa, 25 au 29 mars 1985. CSC, Londres, R.-U.
- De Padua, D.B. 1974. Post-harvest rice technology in Indonesia, Malaysia, The Philippines, and Thailand: a state of the art survey. Centre de recherches pour le développement international, Ottawa (Ontario), Canada.

Annexe

Tableau 6. Analyse^a de la valeur actualisée nette, dans une unité monétaire factice, du séchoir solaire à convection forcée offrant un accroissement de la production.

Année	Coûts en cap.	Frais d'expl.	Coûts totaux	Total des bénéfices	Bénéfices nets	Facteur d'actualisation	Valeur actualisée
0	25 000	--	25 000	0	-25 000	1,0000	-25 000
1	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,8696	67 829
3	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,7561	58 976
4	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,6575	51 285
5	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,5718	44 600
6	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,4972	38 782
7	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,3759	29 320
8	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,3269	25 498
9	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,2843	22 175
10	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,2472	19 282
11	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,2149	16 762
12	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,1869	14 578
13	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,1623	12 675
14	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,1413	11 021
15	5 000	8 000	3 000	75 000	78 000	0,1229	9 586

^a Coûts totaux = coûts en capital + frais d'exploitation; bénéfices nets = total des bénéfices - coûts totaux; valeur actualisée = bénéfices nets x facteur d'actualisation.

Tableau 7. Calcul de la valeur actualisée nette, dans une unité monétaire factice, du séchoir conventionnel.

Année	Coûts du combustible par litre	Frais opérationnels	Bénéfices nets	Facteur d'actualisation	Valeur actualisée
0	--	--	--	1,0000	--
1	2,00	1 500	48 500	0,9091	44 091
2	2,20	1 600	48 400	0,8264	39 998
3	2,42	1 710	48 290	0,7513	36 280
4	2,66	1 831	48 169	0,6830	32 899
5	2,93	1 963	48 037	0,6209	29 826
6	3,22	2 112	47 888	0,5645	27 033
7	3,54	2 271	47 729	0,5132	24 495
8	3,87	2 441	47 559	0,4665	22 186
9	4,28	2 640	47 360	0,4241	20 085
10	4,71	2 855	47 145	0,3855	18 174
11	5,18	3 090	46 910	0,3505	16 442
12	5,70	3 350	46 650	0,3186	14 863

Tableau 8. Calcul de la valeur actualisée nette, dans une unité monétaire factice, du séchoir solaire à convection naturelle.

Année	Bénéfices nets	Facteurs d'act.	Valeur actualisée
0	-10 000	1,0000	-10 000
1	49 500	0,9259	45 832
2	49 500	0,8573	42 436
3	49 500	0,7938	39 293
4	49 500	0,7350	36 383
5	49 500	0,6806	33 690
6	49 500	0,6302	31 195
7	49 500	0,5835	28 883
8	49 500	0,5403	26 745
9	49 500	0,5002	24 760
10	49 500	0,4632	22 928
11	49 500	0,4289	21 231
12	49 500	0,3971	19 656

Tableau 9. Calcul de la valeur actualisée nette, dans une unité monétaire factice, du séchoir solaire à convection forcée avec possibilité de louer la capacité excédentaire.

Année	Bénéfices nets	Facteurs d'act.	Valeur actualisée
0	-25 000	1,0000	-10 000
1	60 500	0,8696	52 611
2	60 500	0,7561	45 745
3	60 500	0,6575	39 779
4	60 500	0,5718	34 594
5	60 500	0,4972	30 081
6	60 500	0,4323	26 154
7	60 500	0,3759	22 742
8	60 500	0,3269	19 777
9	60 500	0,2843	17 200
10	60 500	0,2472	14 956
11	60 500	0,2149	13 001
12	60 500	0,1869	11 307
13	60 500	0,1625	9 831
14	60 500	0,1413	8 549
15	60 500	0,1225	7 435

ANNEXE : PARTICIPANTS AU COLLOQUE

- Sabiba Kou'santa **Amouzou**, Laboratoire sur l'énergie solaire, Institut national des sciences de l'éducation, Université du Bénin, B.P. 1515, Lomé, Togo.
- Edwin A. **Arinze**, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Institute for Agricultural Research, Ahmadu Bello University, PMB 1044, Zaria, Nigéria.
- Michael W. **Bassey**, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, B.P. 11007, CD Annexe, Dakar, Sénégal.
- Modibo **Dicko**, Laboratoire de l'énergie solaire, B.P. 134, Bamako, Mali.
- Niokhor **Diouf**, Division poisson, Institut de technologie alimentaire, B.P. 2765, Dakar, Sénégal.
- Paul **Fleming**, Solar Energy Technology Centre, School of Mechanical Engineering, Cranfield Institute of Technology, Bedford MK43 0AL, Royaume-Uni.
- Messan Kokou **Gnininvi**, Laboratoire sur l'énergie solaire, Institut national des sciences de l'éducation, Université du Bénin, B.P. 1515, Lomé, Togo.
- Joseph C. **Igbeka**, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Technology, University of Ibadan, Ibadan, Nigéria.
- Ernest **Kaptouom**, Laboratoire de mécanique et énergétique, École nationale supérieure polytechnique, B.P. 8390, Yaoundé, Cameroun.
- Edward **Koroma**, Rice Research Station (Rokupr), PMB 736, Freetown, Sierra Leone.
- Hyacinthe **Mbengue**, Centre national de recherches agronomiques, B.P. 53, Bambey, Sénégal.
- Charles **Minka**, Département des énergies renouvelables CENEEMA, Centre national d'études et d'expérimentation du machinisme agricole, B.P. 1040, Yaoundé, Cameroun.
- Geoffrey Christopher **Mrema**, Department of Agricultural Engineering, Sokoine University of Agriculture, B.P. 3003, Morogoro, Tanzanie.
- Adi **N'Jai**, Fisheries Department, Banjul, Gambie.

- P.H. Oosthuizen**, Department of Mechanical Engineering, Université Queen's, Kingston, Ontario, Canada K7L 3N6.
- Herick Othieno**, Kenyatta University College, Appropriate Technology Centre, B.P. 43844, Nairobi, Kenya.
- Ozzie Schmidt**, International Development Research Centre, B.P. 62084, Nairobi, Kenya.
- Frank B. Sebbowa**, Department of Mechanical Engineering, University of Nairobi, B.P. 30197, Nairobi, Kenya.
- Alpha Sheriff**, Department of Mechanical Engineering, Université Queen's, Kingston, Ontario, Canada K7L 3N6.
- Charles Speirs**, Industrial Development Department, Tropical Development and Research Institute, Culham, Abingdon, Oxfordshire, OX14 3DA, Royaume-Uni.
- Charles Wereko-Brobby**, Commonwealth Science Council, Marlborough House, Pall Mall, Londres, SW1Y 5HX, Royaume-Uni.
- Malcolm Whitfield**, Department of Mechanical Engineering, Fourah Bay College, University of Sierra Leone, Freetown, Sierra Leone.
- Yahaya Yaou**, Office de l'énergie solaire, B.P. 621, Niamey, Niger.
- Y.K.L. Yu Wai Man**, École de technologie industrielle, Université de l'Île Maurice, Réduit, Île Maurice.

Personnel du CRDI

- Gilbert Croome**, Division des communications, Centre de recherches pour le développement international, B.P. 8500, Ottawa, Ontario, Canada K1G 3H9.
- Jean-Daniel Dupont**, Division des communications, Centre de recherches pour le développement international, B.P. 8500, Ottawa, Ontario, Canada K1G 3H9.
- Rose-Marie Erambert**, Centre de recherches pour le développement international, B.P. 11007, CD Annexe, Dakar, Sénégal.
- Marie Élizabeth Turpin**, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, B.P. 11007, CD Annexe, Dakar, Sénégal.

Siège social du CRDI

CRDI, C.P. 8500, Ottawa (Ontario) Canada K1G 3H9

Bureau régional d'Afrique centrale et occidentale

CRDI, B.P. 11007, CD Annexe, Dakar, Sénégal

Bureau régional du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord

CRDI/IDRC, B.P. 14 Orman, Giza, Le Caire, Égypte

Bureau régional d'Afrique orientale et australe

IDRC, P.O. Box 62084, Nairobi, Kenya

Bureau régional d'Asie du Sud-Est et de l'Est

IDRC, Tanglin P.O. Box 101, Singapore 9124, République de Singapour

Bureau régional d'Asie du Sud

IDRC, 11 Jor Bagh, New Delhi 110003, Inde

Bureau régional d'Amérique latine et des Antilles

CIID, Apartado Aéreo 53016, Bogotá, D.E., Colombie

Veillez adresser vos demandes d'information au sujet du CRDI et de ses activités au bureau de votre région.