IDRC-195f

LE SÉCHAGE DES PRODUITS ALIMENTAIRES

Compte rendu du colloque tenu à Edmonton, Alberta
du 6 au 9 juillet 1981

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 cinq secteurs : agriculture, alimentation et nutrition ; information ; santé ; sciences sociales ; 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 Proche-Orient.

© Centre de recherches pour le développement international 1983
Adresse postale : B.P. 8500, Ottawa (Canada) K1G 3H9
Siège : 60, rue Queen, Ottawa

Yaciuk, G.

CRDI, Ottawa CA
Alberta. Dept. of Agriculture CA

IDRC-195f

Le séchage des produits alimentaires : compte rendu du colloque tenu à Edmonton, Alberta du 6 au 9 juillet 1981. Ottawa, Ont., CRDI, 1983. 110 p. : ill.

/Séchage/, /aliments séchés/, /aliments déshydratés/, /valeur nutritive/ — /fruits séchés/, /conservation du poisson/, /céréales/, /café/, /légumes/, /commercialisation/, /demande de consommation/, /énergie solaire/, /déshydratation/, /aspects techniques/, /liste des participants/.

CDU: 664.8.047

ISBN: 0-88936-377-3

Édition microfiche sur demande

This publication is also available in English.

IDRC-195f

Le séchage des produits alimentaires

Compte rendu du colloque tenu à Edmonton, Alberta du 6 au 9 juillet 1981

Rédacteur : Gordon Yaciuk

Sous le patronage du
Centre de recherches pour le développement international,
Ottawa (Canada)

avec la collaboration du
Ministère de l'Agriculture de l'Alberta,
Edmonton (Canada)

Résumé/Abstract/Resumen

Les auteurs de ce volume sont des chercheurs et des techniciens venus de pays très différents les uns des autres du point de vue climat, géographie et conditions socio-économiques. Les disciplines représentées étaient aussi très diverses : économie domestique, alimentation, nutrition, physique, génie mécanique.

Le colloque a examiné les questions les plus importantes en ce qui concerne la conception et l'utilisation d'une installation de séchage : besoins en matière de séchage, l'accueil du consommateur, transmission de la chaleur et évacuation de l'humidité, sources de chaleur. Le chapitre sur les besoins en matière de séchage traite de la nécessité et de la durée de cette opération, de la préparation des échantillons, de l'action du séchage sur la qualité du produit, des problèmes de réhydratation et des problèmes de stockage du produit sec. Le chapitre sur l'accueil du consommateur traite des effets du séchage sur la valeur nutritive du produit, de la commercialisation d'un produit sec et de l'aide que peuvent apporter les consommateurs à l'amélioration d'un procédé ou d'un produit. Le chapitre sur la transmission de la chaleur et l'évacuation de l'humidité traite de la théorie et de la conception d'un séchoir, des modes de réglage et décrit une installation en service. Enfin, le chapitre sur les sources de chaleur donne des exemples de l'utilisation du soleil, des produits pétroliers, des déchets agricoles et du bois. Un exposé des conclusions dégagées par le colloque et de ses recommandations est présenté à la fin de l'ouvrage.

The authors of this volume include researchers and scientists from many countries that encompass diverse climatic, geographic, and socioeconomic conditions. Their disciplines were also numerous: home economics, food science, nutrition, physics, and engineering.

The workshop covered the most important areas in the design and operation of a drying system. These are: drying requirements, consumer acceptance, heat and mass transfer, and heat sources. Within drying requirements, the need for drying the product is discussed as well as drying times and rates, sample preparation, quality changes during drying, rehydration problems, and problems with storage of the dried product. The section on consumer acceptance includes the effects of drying on the nutritive value of food, the introduction of a dried food to the consumer market, and how consumers provide valuable information to scientists to help in improving a process or product. The theory and design of a drying chamber and process control are explained under heat and mass transfer and an operational, full-scale drying system is examined. Finally, under heat sources, a number of examples are given in the use of the sun, petroleum products, agriculture wastes, and wood as heat sources for a drying process. A final concluding commentary is made on the overall recommendations derived from the workshop and proposals for future work are given.

Los autores de este volumen comprenden investigadores y científicos de varios países que, en conjunto, abarcan diversas condiciones climáticas, geográficas y socio-económicas. Sus disciplinas respectivas también son numerosas: economía del hogar, ciencias de alimentación, nutrición, física e ingeniería.

El cursillo abarcó los aspectos más importantes en el diseño y operación de un sistema de deshidratación. Estos son: requisitos de la deshidratación, aceptación por el consumidor, trasferencia de calor y masa y fuentes de calor. Entre los requisitos se examina la necesidad de deshidratar el producto así como los tiempos e índices del proceso, preparación de muestras, cambios en calidad durante le deshidratación, problemas que presenta la rehidratación y problemas resultantes del almacenamiento del producto deshidratado. La sección de aceptatión por el consumidor comprende los efectos de la deshidratación sobre el valor nutritivo del alimento, la introducción de un alimento deshidratado en el mercado del consumidor, y como éstos a su vez proveen información valiosa a los científicos ayudándoles a mejorar un proceso o producto. Se explican la teoría y diseño de la cámara de deshidratación y el proceso de controlbajo trasferencia de calor y masa, examinándose un sistema operativo de deshidratación a escala comercial. Finalmente, y bajo el concepto de fuentes de calor, se citan varios ejemplos relacionados con el uso del sol, de productos petrolíferos, y desechos agrícolas, asi como el de la madera como fuentes de calor para procesos de deshidratación. Se efectua un comentario final sobre recomendaciones generales derivadas del cursillo al tiempo que se efectúan propuestas para el trabajo futuro.

Table des matières

Avant-propos 5

Participants 6

Introduction

Thème et objectifs du colloque **G. Yaciuk** 9

Besoins en matière de séchage

Le séchage du poisson en Inde **P.V. Prabhu et K.K. Balachandran** 11

Le séchage des légumes en Égypte **H.M. Ali et I.A. Sakr** 15

Le séchage des pommes de terre (*papa seca*) au Pérou **C. Lescano** 21

Le séchage du paddy en Indonésie **Suahyadi** 27

Accueil du consommateur

Les effets du séchage sur la valeur nutritive des produits alimentaires au Kenya **M.I. Gomez** 31

L'introduction du niébé dans l'alimentation du nord-est de la Thaïlande **T. Ngarmsak, M.D. Earle et A.M. Anderson** 36

Adoption de la banane déshydratée comme aliment de sevrage à Costa Rica **Celsa Lastreto G., Rodney Cooke et Armando Campos S.** 40

Commercialisation du poisson séché dans l'est de Java (Indonésie) **J.A. Sumardi, H. Purnomo, W.H. Susanto, Putiati, Darius et I. Suryo** 47

Transmission de la chaleur et extraction de l'humidité

Le séchage des grains de céréales aux Philippines **S.C. Andales** ... 53

Le séchage des oignons au Niger **A. Ba, Ch. Banzet et J.M. Degbe** 63

Le séchage du poisson aux Philippines **Ernesto V. Carpio** 65

Le séchage des raisins dans le nord du Chili **J.M. Olhagaray** 74

Sources de chaleur

L'énergie solaire comme source de chaleur pour le séchage des récoltes en Sierra Leone **Michael W. Bassey** 77

Le séchage solaire et à l'air libre du paddy en Corée **Hak Kyun Koh et Chang Joo Chung** 86

Un séchoir à grains pour la ferme en Thaïlande **Sriwai Singhagajen** 94

Appréciation de la valeur économique de diverses sources d'énergie pour le séchage du café **R. Garcia, C. Porres, J.F. Calzada, J.F. Menchu et C. Rolz** 99

Séchoirs pour les coopératives de production alimentaire en Indonésie **Sjachputra** 105

Conclusions

Commentaires **G. Yaciuk** 109

Avant-propos

Aussi loin que l'on remonte dans l'histoire, les humains ont eu recours aux radiations solaires pour sécher les céréales, les légumes et les fruits, ainsi que le poisson et la viande dont ils se nourrissaient. Dans plusieurs pays, on utilise encore largement les rayons du soleil comme source directe d'énergie pour sécher et déshydrater les produits alimentaires. Le coût des combustibles fossiles s'avérant élevé, le séchage solaire direct ou indirect prendra de plus en plus d'importance dans le monde comme procédé de conservation des aliments.

Le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) subventionne plusieurs projets de recherche dans lesquels la radiation solaire intervient seule ou combinée avec la combustion de déchets agricoles comme moyen de sécher des plantes cultivées et d'autres produits alimentaires. Plusieurs de ces projets étudient l'influence des procédés de dessication sur la préservation des éléments nutritifs.

Comme les divers projets subventionnés par le CRDI touchant la déshydratation des produits et le séchage des céréales se situent dans des pays dont les conditions d'environnement sont fort différentes, et comme l'éventail des activités s'y rapportant couvre plusieurs disciplines scientifiques, il a été jugé opportun de convoquer des spécialistes de la recherche représentatifs de la diversité géographique et scientifique dont on doit tenir compte.

On a donc organisé, du 6 au 9 juillet 1981, à l'Université de l'Alberta et avec la collaboration du ministère de l'Agriculture (ADA) de cette province, un colloque comportant deux journées de réunions, une journée organisée par l'ADA consacrée à la visite d'une installation de séchage du grain, d'une ferme locale et d'un élévateur primaire, ainsi qu'une journée de visites privées de divers participants à des départements universitaires et à des organismes commerciaux. Les pays suivants étaient représentés au colloque : Bangladesh, Chili, Costa Rica, Corée, Égypte, Guatemala, Inde, Indonésie, Kenya, Malaisie, Mali, Niger, Pérou, Philippines, Sierra Leone, Singapour, Thaïlande et Zambie ; une immense diversité de conditions climatiques, géographiques et socio-économiques étaient donc représentées. L'expérience des participants s'étendait à l'économie domestique, les sciences de l'alimentation, la physique et l'ingénierie. Les principaux sujets dont il a été traité étaient surtout les besoins en matière de séchage, l'accueil du consommateur, la transmission de la chaleur et l'extraction de l'humidité et les sources de chaleur. Le présent ouvrage rassemble les communications qui ont été présentées et discutées ainsi que les commentaires du coordonnateur technique du colloque.

Mes collègues de la Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition (SAAN) estiment, que grâce à la qualité des exposés préparés par les participants, cette brochure sera utile aux personnes des pays en développement qui partagent les mêmes besoins et les mêmes intérêts.

J.H. Hulse, *Directeur*
Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition

Participants

A. Alam, Coordonnateur du projet d'études techniques post-récolte, Institut central de génie rural, Complexe Shri Guru Tegh Bahadur, T.T. Nagar, Bhopal 462 003 (Inde).

Hatem Mohamed Ali, Chef du laboratoire de nutrition des animaux et de la volaille, Centre national de recherches, Dokki, Le Caire (Égypte).

Silvestre C. Andales, Professeur adjoint et directeur de projet, Projet post-récolte UPLB/CRDI, Département des techniques de transformation des produits agricoles, Université des Philippines à Los Baños, College, Laguna 3720 (Philippines).

M. Zohadie Bardaie, Département de génie rural, Universiti Pertanian Malaysia, Serdang, Selangor (Malaisie).

Michael W. Bassey, Département du génie mécanique, Fourah Bay College, Université de Sierra Leone, Freetown (Sierra Leone).

Ernesto V. Carpio, Ingénieur de projet, Département des sciences et des techniques alimentaires, Université des Philippines à Los Baños, College, Laguna 3720 (Philippines).

Teoh Inn Chek, Lembaga Padi Dan Beras Negara, Tingkat 20–21, Bangunan UMBC, 4, Jalan Sulaiman, Kuala Lumpur, Peti Surat 108 (Malaisie).

Chong Thean Chhong, Section de chimie et de transformation alimentaire, Institut des normes et de la recherche industrielles de Singapour, Maxwell B.P. 2611, Singapour 9046 (République de Singapour).

J.M. Degbe, Office national de l'énergie solaire, B.P. 621, Niamey (Niger).

Dante B. de Padua, Chef d'équipe technique, Programme coopératif de recherches et de développement post-récolte dans le Sud-Est asiatique, a/s SEARCA, College, Laguna 3720 (Philippines).

W. Edwardson, Administrateur de programme principal, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454, Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

R.S. Forrest, Directeur associé, Secteur des techniques et projets ménagers, ministère de l'Agriculture de l'Alberta, Agriculture Building, 9718 107 Street, Edmonton, Alberta (Canada).

Ricardo García, Ingénieur, Division de la recherche appliquée, Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial, Avenida La Reforma 4–47 Zone 10, Apartado Postal 1552 (Guatemala) C.A.

Celsa Lastreto Gomez, Centro de Investigaciones on Tecnología de Alimentos, Universidad de Costa Rica, San Jose (Costa Rica).

M.I. Gomez, Maître de conférence, Département des sciences et des techniques de l'alimentation, Faculté d'agriculture, Université de Nairobi, B.P. 29053, Kabete, Nairobi (Kenya).

H.K. Koh, Professeur associé, Division du machinisme agricole et des techniques de transformation, Département du génie rural, Collège d'agriculture, Université nationale de Séoul, Suweon (Corée) 170.

Carlos Lescano, Jefe, Departamento de Tecnología de Alimentos y Productos Agropecuarios, Universidad Nacional Agraria La Molina, Apartado 456, Lima (Pérou).

J. Lorenzana, Département du génie rural, Isabela State University, Echaque, Isabela (Philippines).

Joseph M. Mwale, Agent scientifique principal, Section de la recherche en techniques alimentaires, Conseil national de la recherche scientifique, B.P. CH-158, Chelston, Lusaka (Zambie).

Candido Joven Miguel, Pasig Distributors Corporation, 114 Plaza Rizal, Pasig, Metro Manila (Philippines).

Tipvanna Ngarmsak, Département des produits agricoles, Faculté d'agriculture, Université de Khon Kaen (Thaïlande).

J.M. Olhagaray, Institut de recherche technologique (INTEC/CHILE), Casilla 667, Santiago (Chili).

P.V. Prabhu, Scientifique, Institut central des techniques de la pêche, Projet de transformation du poisson CIFT/CRDI, Willingdon Island, Matsyapuri P.O., Cochin 682 029 (Inde).

Abdus Satter, Agent scientifique principal, Génie rural, Institut de recherche agricole du Bangladesh, Joydebpur, Dacca (Bangladesh).

O.G.A. Schmidt, Administrateur de programme, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

Sriwai Singhagajen, Chef, Section du traitement et du stockage, Division du génie rural, Département de l'agriculture, ministère de l'Agriculture et des coopératives, Bangkhen, Bangkok 9 (Thaïlande).

Wenceslao M. Sison, Superviseur des plans et programmes agricoles et directeur de projet, Direction générale de la recherche et des services techniques, Service national de l'alimentation, 101 E. Rodriguez Sr. Avenue, Matimyas Building, Quezon City (Philippines).

Sjachputra, a/s Haji Muslimin Nasution, Ministry of Co-operatives, Departemen Perdagangan Dan Koperasi, Sekretariat Menteri Muda Urusan Koperasi, B.P. 384, Jakarta (Indonésie).

Suahyadi, Directeur de projet, Bureau national de logistique (BULOG), Projet BULOG/CRDI sur la technologie post-récolte du riz, B.P. 2345, Jakarta (Indonésie).

J.A. Sumardi, Departemen Pendidikan Dan Kebudayaan, Universitas Brawijaya, Proyek Kerjasama Unibraw/IDRC, Jalan Mayjen Haryono 169, Malang, Jatim (Indonésie).

Salomon Chavez Tapia, Departamento de Tecnología Pesquera, Universidad Nacional Agraria La Molina, Apartado 456, Lima (Pérou).

Cheick Oumar Traoré, Laboratoire de l'énergie solaire, B.P. 134, Bamako (Mali).

S. Vogel, Administrateur de programme, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

G. Yaciuk, Administrateur de programme, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, Centre de recherches pour le développement international, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

Personnel du CRDI

M.C. Beaussart, Administrateur adjoint, Division des sciences de l'agriculture, de l'alimentation et de la nutrition, CRDI, 10454 Whyte Avenue, Suite 304, Edmonton, Alberta (Canada).

A. Chouinard, Rédactrice technique, Division des communications, CRDI, B.P. 8500, Ottawa, Ontario (Canada) K1G 3H9.

K. Kealey-Vallière, Rédactrice technique adjointe, Division des communications, CRDI, B.P. 8500, Ottawa, Ontario (Canada) K1G 3H9.

L'énergie solaire comme source de chaleur pour le séchage des récoltes en Sierra Leone

Michael W. Bassey[1]

Résumé L'énergie solaire est fréquemment utilisée comme source de chaleur dans les pays en développement. Une des applications les plus courantes, surtout dans les régions rurales, est le séchage des produits agricoles. Cet exposé en étudie divers modes d'utilisation à cette fin.

On évaluera ici l'énergie solaire disponible et son utilisation dans divers types de séchoirs. On y résumera les facteurs affectant la conception de ces installations spécialement destinées aux contrées en développement. D'autres travaux de recherche et de développement s'imposent sur le séchage des récoltes par radiation solaire afin de l'adapter le mieux possible aux besoins de ces pays.

Le séchage des récoltes avec l'aide de l'énergie thermique du soleil se pratique depuis des siècles dans le monde entier ; dans la plupart des pays les procédés n'ont pas changé pour plusieurs raisons reliées en partie au niveau de développement de ces régions. Il est encore de coutume d'étaler les récoltes en plein air au soleil, soit à même le sol, soit sur des plates-formes surélevées. Le procédé est peu coûteux mais n'est pas sans présenter plusieurs inconvénients.

Parmi les désavantages l'on doit mentionner le caractère intermittent de l'ensoleillement, tant pendant la journée qu'aux différentes époques de l'année, les risques de contamination par la poussière et les rongeurs, l'infestation par les insectes, l'exposition des récoltes aux éléments ; autant de causes de pertes et de gaspillage auxquelles s'ajoutent les dégâts causés par les rats, la volaille et les humains.

Les récoltes et les denrées que l'on expose le plus souvent au séchage en plein air incluent les fruits, les légumes, la viande, le poisson, les grains, les épices, le tabac, le café et le cacao. La méthode a également été employée pour l'apprêtage des cuirs et du bois de construction. La qualité des produits obtenue est, le plus souvent, très satisfaisante, bien que susceptible d'améliorations. Ces dernières devraient provenir surtout de diverses modifications aux procédés actuels ou du recours à des systèmes de séchage mieux adaptés à chaque récolte particulière.

1. Department of Mechanical Engineering, Fourah Bay College, University of Sierra Leone, Freetown, Sierra Leone.

Il est possible, fréquemment, de disposer d'installations perfectionnées qui donneront un produit séché de très bonne qualité. Leur prix, cependant, est élevé, la plupart devant utiliser l'énergie électrique pour actionner un ventilateur, et un combustible comme le pétrole ou le gaz pour produire la chaleur nécessaire. Plusieurs pays en développement n'ont pas d'électricité dans les campagnes et les combustibles fossiles doivent être importés. Les progrès de cet ordre paraissent donc peu réalisables à l'heure actuelle. Dans l'Est africain où cette possibilité semble être économiquement réalisable on pourrait combiner l'énergie solaire et celle du vent. Dans l'Ouest africain, par contre, le vent fait défaut en beaucoup d'endroits.

On s'est attaché, au cours des dernières années, à mettre au point des séchoirs solaires destinés aux activités agricoles. Les modèles obtenus jusqu'ici sont surtout de dimensions modestes mais permettent d'abréger la durée du séchage et d'obtenir un produit de meilleure qualité, comparativement aux procédés traditionnels.

Les facteurs financiers impliqués dans ce genre d'amélioration ont fortement influencé l'orientation donnée à l'utilisation de l'énergie solaire comme source de chaleur dans les pays en développement. Beaucoup de modèles affectés à la déshydratation des récoltes sont d'un prix relativement bas par rapport aux installations en usage dans les pays plus avancés.

Cet exposé traitera donc de l'utilisation de l'énergie solaire aux fins et dans les situations mentionnées ci-dessus. On y explique l'interaction de cette énergie et des séchoirs et l'on y

trouvera de brefs commentaires sur l'utilisation pratique de ces derniers en tenant compte des restrictions techniques et financières actuelles. On y présente également quelques exemples de divers types de séchoirs solaires, qui feront mieux comprendre les possibilités de perfectionnement restant à réaliser.

L'énergie solaire utilisable

L'intensité de la radiation solaire, hors de l'atmosphère terrestre, à la distance moyenne entre le soleil et la terre, est de 1,353 kW/m², intensité qui est réduite, à son tour, à un chiffre inférieur à 1 kW/m² à la surface de la terre sous l'effet des nuages, des particules de poussière et des gaz. L'importance de la radiation solaire utilisable varie en fonction de l'endroit, de l'époque de l'année, de l'heure du jour et des conditions atmosphériques générales.

La radiation solaire utilisable à la surface de la terre est constituée surtout de longueurs d'onde variant de 0,3 à 2,4 μm. Dans la plupart des cas pratiques la radiation utilisable est comprise entre 0,38 et 2 μm, couvrant la portée visible (0,38–0,78 μm) et la proche infrarouge (0,78 à 2 μm). La variation d'intensité de la radiation solaire d'après les longueurs d'onde est reproduite dans la figure 1, ainsi que son intensité en dehors de l'atmosphère terrestre et à la surface de la terre. On y voit également l'absorption de la radiation par divers gaz. On notera combien l'atténuation peut être considérable dans tout le spectre.

La radiation totale incidente sur une surface horizontale s'appelle radiation globale ou insolation. Elle comprend la radiation par rayonnement direct, la radiation diffuse et la radiation par réflexion. La radiation directe provient du soleil par un parcours linéaire. La radiation diffuse, cependant, est répartie par toute la voûte céleste où elle est dispersée par les gaz, les particules flottant dans l'air, etc. La composante diffuse de la radiation peut varier de 10 % (par journée très claire), à 100 % (par temps très couvert) de la radiation globale. La radiation par réflexion est produite par des surfaces telles que murailles et constructions, le sol ou d'autres matières.

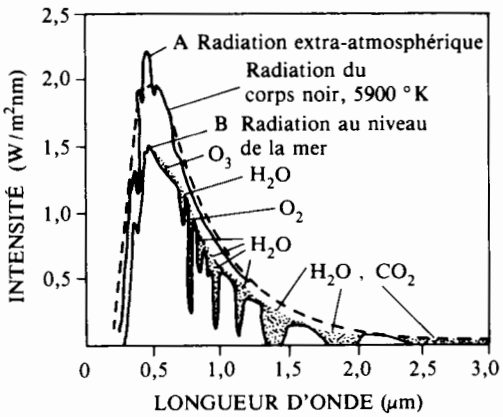

Fig. 1. Variations de l'intensité de la radiation d'après la longueur d'onde.

En pratique, on mesure la quantité de radiation solaire utile à l'aide d'appareils spécialement conçus pour une de ses composantes particulières. Les pyranomètres servent à mesurer la radiation totale, et les pyrehéliomètres la radiation directe. Il en existe divers types (Coulson et Howell, 1980). On mesure la radiation diffuse à l'aide d'un anneau intercepteur qui empêche la composante directe d'atteindre le pyranomètre.

Dans l'utilisation du séchage solaire, il importe de connaître la radiation globale. Bien qu'on puisse la mesurer avec un pyranomètre, le manque d'infrastructure appropriée à l'acquisition des données pertinentes pose des problèmes dans les pays en développement dont plusieurs ne disposent que de chiffres relatifs à quelques années et seulement à un petit nombre d'endroits. Généralement aussi les fonds manquent pour l'achat d'équipements qui permettraient, par exemple, d'observer la radiation solaire en des endroits expérimentaux. Ces restrictions compliquent la mise au point de séchoirs appropriés.

On peut obtenir des estimations de la radiation solaire globale en recourant à des équations empiriques que l'on retrouve dans la documentation existante (Ånström, 1924 ; Reddy, 1971 ; Bassey, 1978 ; Hoyt, 1978 ; Notaridou et Lalas, 1979). Ces données météorologiques servent à cette estimation de la radiation globale.

Une des formules les plus courantes est celle d'Ånström (1924) et elle s'appuie sur des données relatives à la durée d'ensoleillement que l'on peut recueillir à l'aide d'un enregistreur d'insolation. Voici l'équation :

$$Q/Q_o = a + b\ n/N$$

dans laquelle Q représente la radiation globale reçue par une surface horizontale, Q_o est la radiation théorique sur la surface en supposant l'absence d'atmosphère, n est la durée effective de l'insolation et N la durée maximale possible de l'insolation ; a et b sont des constantes, qui dépendent de l'endroit, a étant relativement constant, tandis que b dépend de la latitude.

Hoyt (1978) s'est servi de valeurs climatolo-

giques comme le total de l'eau précipitable, et l'albedo de la surface. Une autre étude (Notaridou et Lalas, 1979) utilise comme paramètres l'élévation, l'humidité absolue et la couverture de nuages pour prévoir la radiation solaire globale. Reddy (1971), dans ses recherches, s'est fondé sur la longueur moyenne des jours, le nombre de jours pluvieux par mois, et l'humidité mensuelle moyenne pour parvenir à la même estimation.

On a remarqué (Bassey, 1978) que les données dont on dispose touchant la radiation utilisable en certains endroits ne sont pas sûres, ce qui fait ressortir la valeur des estimations ci-dessus. On peut généralement se faire une idée de l'exactitude des prédictions, par comparaisons avec des informations fiables recueillies dans d'autres endroits présentant des caractères climatiques semblables, sous les mêmes latitudes. La rareté de données vérifiées sur la radiation solaire dans un endroit quelconque ne devrait donc pas être un empêchement à l'étude pratique du séchage solaire, puisqu'on peut d'ores et déjà recourir à des estimations qui serviront de base à des développements ultérieurs.

Modes d'utilisation de l'énergie solaire pour la déshydratation

L'énergie solaire est, depuis la plus haute antiquité, la méthode la plus employée pour le séchage des récoltes dans les pays en développement où le procédé le plus fréquent est le séchage à l'air libre. Cependant, pour utiliser plus efficacement cette abondante source d'énergie, on a réalisé divers systèmes répondant à des besoins particuliers.

Les séchoirs agricoles peuvent utiliser l'énergie solaire de différentes façons et l'on peut, à ce sujet, les diviser en deux catégories principales : les séchoirs actifs et les séchoirs passifs. Les premiers utilisent un dispositif extérieur comportant, par exemple, un ventilateur pour faire circuler l'air ; les seconds n'en utilisent pas.

Bien que les systèmes passifs semblent se prêter de façon plus réaliste à l'usage des pays en développement en raison des modestes investissements qu'ils nécessitent et de leur économie fonctionnelle, la possibilité demeure de recourir à des systèmes actifs dans le cas d'entreprises relativement considérables. Leur utilisation spécifique dépendra donc de divers facteurs comme l'existence d'une source d'énergie utilisable, l'ampleur de l'installation, la situation géographique, le projet envisagé et la possibilité de se procurer les matériaux nécessaires. Examinons les modalités d'application de l'énergie solaire au séchage des récoltes.

Séchage à l'air libre

Cette méthode fait intervenir l'insolation, les vitesses du vent, les températures de l'air ambiant et son humidité relative pour réduire le contenu humide des produits à sécher. Elle présente de nombreuses variantes mais est largement utilisée en raison de son économie foncière.

On étalera par exemple, la récolte sur une aire préalablement débarrassée des feuilles, des pierres et de la végétation. L'énergie solaire incidente sur la couche mince ainsi exposée fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'humidité. Les mécanismes qui interviennent dans ce processus sont bien connus et ont été décrits dans la documentation pertinente ; citons simplement : la conduction, la convection et la radiation.

La radiation du soleil réchauffe le sol et l'air ambiant. La chaleur se transmet à la récolte par conduction à partir du sol, par conduction et par convection à partir de l'air au voisinage de la récolte, et par radiation provenant du soleil et de l'air ambiant. L'humidité à la surface de la récolte, ou à proximité de celle-ci, est ainsi chauffée et s'évapore, et le flux d'eau des parties profondes se déplace alors vers la surface. La chaleur transmise à la récolte peut aussi pénétrer la masse par conduction, libérant à son tour de la vapeur d'eau. Ainsi donc, le taux de séchage dépend de la radiation utilisable et de la température du sol.

Durant le séchage à l'air libre, l'on devra faire en sorte que le sol ne s'échauffe au point d'endommager la récolte. On étend parfois celle-ci sur une aire en ciment ou en asphalte. Le procédé est plus coûteux en raison des dépenses afférentes à la préparation de la surface, mais il a l'avantage de favoriser le réchauffement de celle-ci, comparativement au sol nu.

En raison de la faible circulation verticale de l'air ou de son absence, à travers la récolte, celle-ci doit être étendue en couche mince pour sécher en plein air, ce qui nécessite des surfaces considérables. Si donc la méthode est relativement économique, elle présente de nombreux inconvénients, ainsi que nous l'avons mentionné plus haut.

Un autre mode de séchage à l'air comporte l'érection de plates-formes à ciel ouvert soutenant des claies sur lesquelles la récolte est étendue, évitant ainsi une partie des inconvénients offerts par le séchage à même le sol. Les rongeurs et les insectes, les fourmis en particulier, peuvent plus difficilement s'y attaquer. Pour mieux utiliser

l'énergie solaire, le fond des claies devrait être en treillis métallique et les claies peintes en noir afin de mieux retenir la chaleur et la transmettre à la récolte. En cas pareil, on peut augmenter l'épaisseur de la couche mise à sécher grâce à la meilleure circulation de l'air rendue possible par le treillis métallique.

Le séchage à l'air sur claies ou plates-formes peut s'appliquer aux fèves, au café, au cacao, etc. Pour d'autres récoltes, comme les raisins, on peut les empiler l'une par-dessus l'autre et les recouvrir d'un toit pour les protéger de la rosée ou des pluies. Ce procédé est en usage en Australie, il est peu coûteux et permet de traiter de grosses quantités de raisins.

Séchage direct

L'exposé concernant le séchage à l'air libre montre que l'air servant à déshumidifier les récoltes agit à la température ambiante et à l'humidité relative (HR). Toutefois, il est bien connu que l'air, à une température et à une humidité relative données, voit diminuer son humidité relative lorsqu'on le chauffe. Ainsi, l'air chauffé extrait plus d'humidité de la récolte que l'air non chauffé. On s'est inspiré de cette constatation dans la construction de divers séchoirs solaires utilisant des procédés directs et indirects de chauffage de l'air ambiant.

Les séchoirs directs comportent une enceinte fermée munie d'une couverture transparente. La récolte y est placée sur des claies et l'énergie solaire est absorbée à la fois par la récolte et par la masse interne du séchoir. La température en s'élevant déshumidifie la masse. L'air chaud humide est évacué par des orifices d'aération ménagés, en général, dans les côtés, l'air frais étant aspiré par d'autres orifices dans la base. Il en résulte donc une circulation constante de l'air ambiant dans le séchoir.

Le Brace Research Institute (BRI, 1979) a fait une revue de ces séchoirs et la figure 2 illustre un modèle typique. La chaleur s'accumule par un effet de serre et l'air humide s'échappe par les orifices prévus. Plusieurs de ces séchoirs directs ont des côtés et un fond isolés. Leur efficacité dépend d'une bonne isolation (étanchéité satisfaisante de la couverture en verre ou en plastique pour empêcher tout mouvement non contrôlé de l'air). Dans ces séchoirs la température peut s'élever à plus de 100 °C d'après le genre et la masse de la récolte à déshydrater. On devra donc veiller à ce que le produit à obtenir ne soit pas surchauffé.

Les séchoirs moins coûteux fonctionnant à l'énergie solaire ne sont pas isolés. Le haut et les

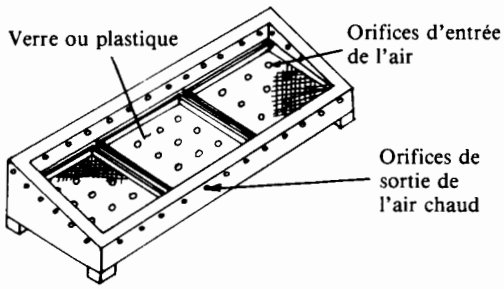

Fig. 2. Schéma d'un séchoir direct typique.

côtés sont garnis d'un revêtement transparent agissant comme collecteur des rayons solaires et protégeant la récolte contre la poussière, les intempéries et les insectes.

La conception des séchoirs directs place la récolte immédiatement sous les couvertures transparentes, inclinées à l'angle voulu pour capter le maximum de radiation. L'amplitude de l'angle peut se calculer d'après les endroits. Toutefois, comme elle change au cours de l'année on recommande comme valeur à adopter : α = latitude + 10°. Bien que cette inclinaison puisse ne pas donner les meilleurs résultats lorsque le séchoir est en service toute l'année, on conviendra que la poursuite du soleil constituerait un exercice onéreux qui rendrait toute l'opération fort peu économique.

La couverture transparente peut être à simple ou double épaisseur avec un intervalle d'environ 1 cm entre les deux. La double couverture a pour effet de réduire les pertes de chaleur par convection dans l'air ambiant et d'augmenter ainsi la température dans la chambre de séchage. Cette élévation de température a l'avantage d'abaisser suffisamment l'humidité relative de l'air pour empêcher la réabsorption de l'eau par la récolte, ce qui prolongerait d'autant le processus du séchage. On devra peut-être adopter la double couverture transparente là où les vitesses du vent restent constamment élevées aux époques du séchage. Le refroidissement de la couverture en verre provoque une déperdition de chaleur accompagnée de condensation sur la surface transparente intérieure de la chambre. En conséquence, le contenu humide des produits augmente et la quantité de radiation traversant la couverture diminue. Ce problème nécessite le recours à un nombre suffisant d'orifices en des endroits stratégiques du séchoir pour assurer l'évacuation de l'humidité.

La régulation de la température dans les séchoirs directs s'effectue en ouvrant ou en fermant les orifices d'évacuation, et elle dépendra de l'expérience de l'usager et du genre de récolte

mise à sécher. On a utilisé avec succès ce genre de séchoirs pour l'okra, les oignons, les abricots, les raisins, l'ail, les prunes, les pêches, les choux-fleurs, etc. (BRI, 1979 ; Bassey, 1980a).

Les points à considérer dans la conception des systèmes à chauffage direct sont, notamment, l'élévation maximale de la température interne, dont dépend l'importance de la charge. Comme on l'a mentionné, l'isolation doit être bonne ; les matériaux disponibles à cette fin peuvent être la sciure ou les copeaux de bois, la fibre de verre, la fibre de noix de coco, la paille, ou d'autres. L'épaisseur de l'isolant variera d'après le matériau utilisé et la différence de température entre l'air ambiant et l'air dans la chambre. On tiendra compte également de la vitesse des vents, facteur qui peut devenir une cause de pertes de chaleur par convection.

Séchage indirect

Dans ce mode de séchage, l'énergie solaire n'entre pas directement en contact avec la récolte. L'air servant à la déshydratation est chauffé dans un collecteur d'air solaire et on le fait ensuite circuler à travers la récolte.

Ce genre de séchoir a été étudié et décrit dans divers ouvrages (Akyurt et Selçuk, 1973 ; Headly et Springer, 1973 ; Satcunanathan, 1973 ; Selçuk et alii, 1974 ; BRI, 1979 ; Bassey, 1980a). L'air peut être mis en circulation par un ventilateur ou par simple convection naturelle. La figure 3 donne une vue schématique d'un séchoir typique de ce genre.

L'énergie solaire est captée dans le réchauffeur d'air par l'effet de serre créé par la couverture transparente et l'absorbeur. En raison de sa légèreté, l'air chaud monte par le collecteur incliné jusque dans la chambre de séchage où est

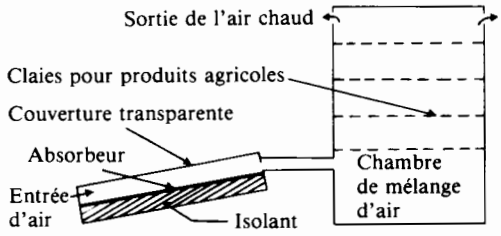

Fig. 3. Schéma des détails principaux d'un séchoir indirect pour récoltes.

placée la récolte. De nombreux agencements sont possibles, selon le mode de circulation d'air adopté.

Dans certains modèles (Akyurt et Selçuk, 1973) on utilisait un collecteur avec couverture en verre et un absorbeur fait de limaille métallique, sur lequel l'air était forcé par un ventilateur et, après échauffement, circulait entre les claies empilées l'une sur l'autre.

Un autre séchoir indirect mentionné par Headly et Springer (1973) est représenté dans la figure 4. L'air ambiant y est chauffé dans le collecteur à double paroi vitrée inclinée, et circule ensuite à travers la récolte par simple convection. Cet air chaud déshumidifie la récolte, se refroidit et descend vers le bas de la chambre de séchage. Parcourant un circuit en boucle fermé, l'air humide est attiré dans le collecteur par un conduit dans lequel l'humidité se condense. Ce système a servi au séchage de l'igname, de la patate douce, de l'oseille et de graminées.

Bassey (1980a) fait état d'un séchoir simple dans lequel l'air circule par convection naturelle, et que présente la figure 5. Il sert au séchage du riz et utilise deux types de collecteurs. Dans le premier, l'air passe entre le couvercle en verre et la plaque absorbante noire, tandis que dans le deu-

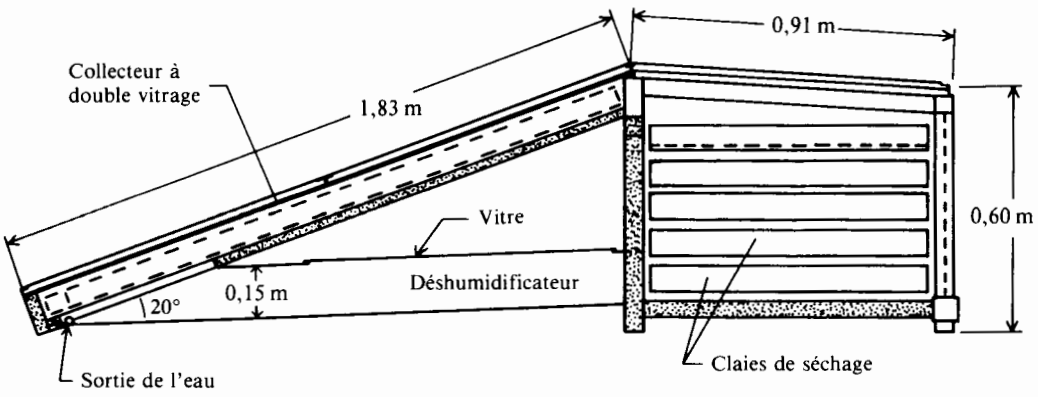

Fig. 4. Schéma d'un séchoir indirect pour récoltes mis au point par Headly et Springer (1973).

Fig. 5. Séchoir solaire pour produits agricoles, avec cheminée.

xième la circulation a lieu sur les deux faces de la plaque absorbante. Un autre type, utilisant une feuille de plastique comme couverture transparente, utilise des enveloppes de riz brûlées comme absorbant (Exell, 1978). Les parois latérales du séchoir sont en plastique et l'air circule sans l'aide d'un ventilateur.

Les séchoirs indirects doivent porter l'air à des températures permettant de déshydrater les récoltes. La conception des réchauffeurs d'air pour les pays en développement doit viser à minimiser les matériaux nécessaires afin de rendre économiquement attrayante l'acquisition d'un séchoir.

En utilisant un simple vitrage et un collecteur bien isolé, on peut obtenir des températures de 140 °C sur la plaque absorbante. Pour utiliser cette chaleur, on fait circuler l'air sur la plaque. Dans certains modèles, la circulation s'effectue sur une seule face tandis que l'autre face de la plaque est en contact avec un matériau isolant pour empêcher les pertes thermiques par l'arrière du collecteur. Dans un autre modèle, la circulation de l'air se fait sur les deux faces de la plaque (Fig. 6 et 7).

On peut également envisager un collecteur utilisant deux couvercles en verre. Dans ce cas, la circulation d'air peut être dirigée comme dans la

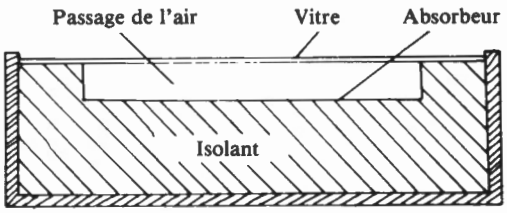

Fig. 6. Schéma d'un réchauffeur d'air dans lequel la chaleur est enlevée sur une des faces de l'absorbeur.

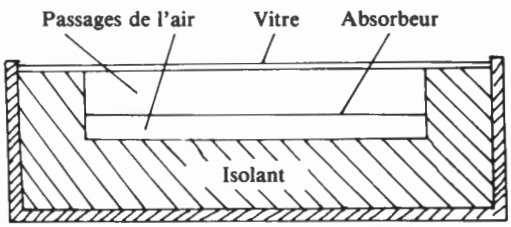

Fig. 7. Schéma d'un réchauffeur d'air dans lequel la chaleur est enlevée sur les deux faces de l'absorbeur.

figure 8. La chaleur s'accumule dans l'espace compris entre le double vitrage et se transmet ensuite au côté inférieur de la plaque absorbante. Ce modèle n'exige pas d'isolant, l'air chaud traversant la récolte immédiatement après avoir

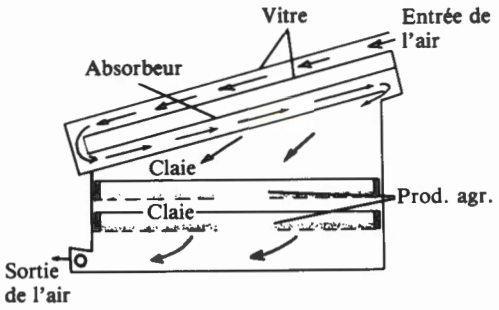

Fig. 8. Collecteur à double vitrage.

quitté la plaque absorbante (Satcunanathan, 1973).

Dans la plupart des modèles existants, le déplacement de l'air provient d'un appareil mécanique, comme un ventilateur. Compte tenu des moyens limités des pays en développement mentionnés plus haut, ces systèmes peuvent fréquemment s'avérer coûteux. On peut tirer parti de l'effet ascendant de l'air chaud en ajoutant une cheminée au dispositif (Fig. 5) ; le tirage produit suffit généralement pour qu'un flux d'air adéquat traverse le collecteur et ensuite les produits. Ce mode de circulation de l'air ne paraît pas susciter grand intérêt dans le cas des séchoirs solaires bien qu'il ait beaucoup d'importance dans certaines parties du monde. Des travaux sont en cours, actuellement, comme nous l'avons rapporté d'après divers chercheurs, en vue de recourir à la convection naturelle.

Une de ces études (Bassey, 1980b) cherche actuellement à améliorer la circulation de l'air en utilisant la radiation solaire pour chauffer directement la cheminée, ce qui aurait pour effet d'élever les températures de l'air et d'accroître son mouvement ascendant. La figure 9 montre une cheminée enduite d'un vernis plastique noir. Des observations préliminaires ont relevé des températures plus élevées à l'intérieur de la cheminée dont la hauteur, par ailleurs, peut être réduite en utilisant ce procédé.

Plusieurs études ont révélé l'utilité des séchoirs indirects dans les pays en développement. Leur conception dépendra cependant des conditions locales et des moyens matériels existants. Le modèle le plus pratique et le plus efficace devra tenir compte de la température et de l'humidité relatives de l'air ambiant, de la température maximale admissible pour le produit à sécher et de son volume. Le modèle de la chambre, par exemple, variera s'il s'agit de fruits ou de grains à sécher. Un autre point à considérer est l'adaptabilité du système prévu : il est en effet souhaitable, mais pas toujours réalisable, de disposer d'un séchoir

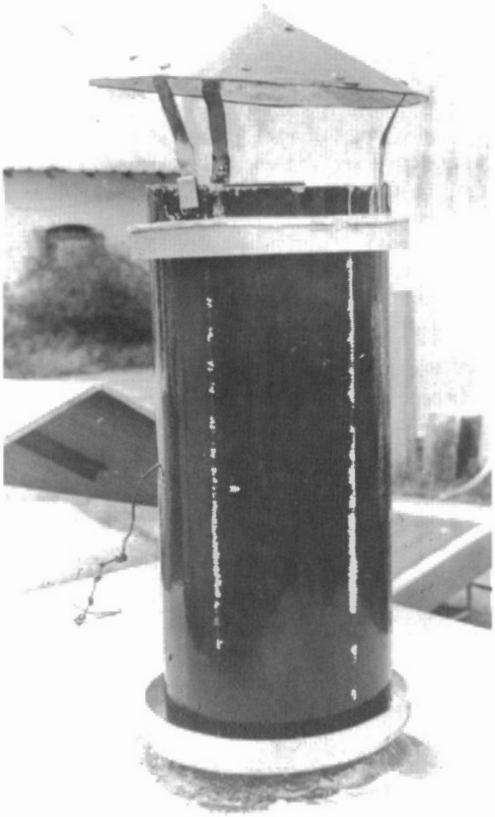

Fig. 9. Cheminée enduite d'un simple vernis plastique permettant d'obtenir des températures plus élevées.

solaire pouvant traiter divers types de récoltes, ce qui en augmenterait l'économie.

Séchoirs hybrides et mixtes

L'utilisation de l'énergie solaire dans un séchoir pouvant effectuer aussi bien le chauffage direct que l'indirect permet ce qu'on appelle le séchage mixte. Ce procédé agit d'après un effet de serre à la fois dans la chambre de séchage et dans le collecteur. Bien que cet exposé n'entende pas traiter de l'influence de l'ensoleillement sur la qualité du produit séché, l'on doit mentionner que les séchoirs de type mixte utilisent l'action directe du soleil pour améliorer la qualité de certains produits agricoles. Ces séchoirs ne diffèrent pas sensiblement des autres modèles représentés sauf en ce qu'ils possèdent des parois latérales et supérieures en matériaux transparents comme le verre ou le plastique.

Les séchoirs hybrides sont ceux qui combinent

l'énergie solaire et un chauffage complémentaire. La source de chaleur est alors soit un combustible fossile, l'électricité, ou des déchets agricoles, etc. Il ne sera pas question dans cet exposé de la conception ni du fonctionnement de ces systèmes ; on retiendra simplement que dans certains endroits l'absence d'énergie solaire ne permet pas, pendant au moins quelques mois de l'année, d'effectuer la dessication des produits. On ne peut non plus utiliser les séchoirs solaires la nuit. C'est pourquoi les systèmes comportant un moyen de chauffage complémentaire pourraient s'avérer utiles dans les pays en développement.

Matériaux de fabrication pour séchoirs solaires

La construction de séchoirs solaires destinés aux pays en développement se heurte fréquemment à des difficultés diverses. On doit, par exemple, pouvoir se procurer sur place les matériaux nécessaires dont le coût, par ailleurs, constitue un autre facteur important de l'évaluation que devra faire le propriétaire de l'installation. Enfin, la durée prévisible du séchoir est un autre point à considérer.

Pour les revêtements transparents, les matériaux à retenir sont le verre et le plastique ; le premier ne se détériore pas avec l'âge, tandis que le plastique est affecté par l'exposition aux rayons solaires. Il est souvent prudent de recourir au plastique là où la fragilité du verre peut causer des problèmes. On peut également utiliser le verre et le plastique dans les collecteurs à double vitrage. Leur arrangement devra cependant permettre au plastique de résister à la chaleur et on conseille de l'utiliser comme revêtement supérieur, ce qui du même coup protégera mieux la vitre intérieure.

Le collecteur peut être fabriqué de bois, de tôle galvanisée ou d'aluminium. L'objectif principal doit être d'éviter le mieux possible les fuites d'air et l'humidification de l'isolant ; la fabrication elle-même doit être simple et d'un prix modéré. Le bois et la tôle d'acier galvanisée peuvent servir à fabriquer de bons réchauffeurs d'air. Divers projets utilisent ces matériaux dans la fabrication de collecteurs solaires, grands et petits. Dans le cas du bois, celui-ci devra être traité préalablement contre les insectes et recevoir quelques couches de peinture hydrofuge.

Les méthodes utilisées pour assujettir le vitrage au collecteur dépendent des matériaux. Pour le verre sur du bois, le mastic convient bien, et pour le plastique on se servira de baguettes de bois clouées. Les agents d'étanchéité comme la silicone conviennent pour certaines applications du verre mais ils deviennent onéreux si on doit en employer de grandes quantités.

Les matériaux isolants sont nombreux et nous en avons mentionné plusieurs. On notera que le recours à des matériaux qu'on peut se procurer sur place pour cet usage ne constitue pas nécessairement une économie : ils pourront parfois être remplacés plus avantageusement par d'autres comme la mousse ou la laine de verre qui n'exigent qu'une épaisseur moindre. Si, par exemple, on veut utiliser la paille comme isolant, l'espace à remplir devra avoir 15 cm de profondeur alors que 5 cm suffiront pour la laine de verre, ce qui nécessitera moins de matériaux de construction.

La chambre de séchage peut être construite en tôle ou en contreplaqué. Les séchoirs mixtes utilisent des matériaux transparents comme le verre ou le plastique sur une ou plusieurs parois. Les claies portant les récoltes à sécher sont en simple treillis métallique.

En général, les matériaux entrant dans la construction de séchoirs solaires sont simples et on peut se les procurer sur place dans la plupart des pays en développement. Des droits d'importation applicables à certains de ces matériaux peuvent parfois en augmenter le prix et, donc, le coût de la construction, mais il est souvent possible d'atténuer cet inconvénient en se procurant sur place d'autres matériaux de remplacement.

Conclusion

L'exposé qui précède a tenté d'apprécier l'usage de l'énergie solaire comme source de chaleur pour le séchage des récoltes. Une documentation existe déjà dont on peut s'inspirer pour fabriquer des séchoirs solaires à diverses fins, d'un fonctionnement satisfaisant. On devra cependant, avant de fixer son choix sur un modèle particulier le soumettre sur place à des tests pratiques. D'autres travaux de recherche et de développement s'imposent dans le sens d'une utilisation plus pratique de l'énergie solaire pour la préservation des récoltes.

Ånström, A.K. 1924. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, p. 121.

Akyurt, M. et Selçuk, M.K. 1973. A solar drier supplemental with auxiliary heating systems for continuous operation. Solar Energy Journal, 14, 313–320.

Bassey, M.W. 1978. A recommended formula for predicting total solar radiation in Sierra Leone. Pre-

sented at the 11th Biennial WASA Conference, 13–18 March 1978, Lomé, Togo.

1980b. Development of solar dryers for agricultural use in Sierra Leone. Interim Report, IDRC Project 3-P-78-0113.

1980a. Solar crop drying in Sierra Leone. Presented at International Symposium on Solar Energy Utilization, 10–20 August 1980, London, Ontario, Canada.

BRI (Brace Research Institute). 1979. A survey of solar agricultural dryers. Technical Report T99, Quebec, Canada, BRI.

Coulson, K.L. et Howell, Y. 1980. Solar radiation instruments. Sunworld, 4(3).

Exell, R.H.B. 1978. A low cost solar rice dryer. Presented at proceedings of the Workshop on Grain Post-Harvest Technology, 10–12 June 1978, Bangkok, Thailand.

Headly, O. St.C. et Springer, B.G.F. 1973. A natural convection crop dryer. Presented at International Congress: The Sun in the Service of Mankind, 2–6 July 1973, Paris, France.

Hoyt, D. 1978. A model for the calculation of solar global radiation. Solar Energy Journal, 21(1).

Notaridou, V.A. et Lalas, D.P. 1979. The distribution of global and net radiation over Greece. Solar Energy Journal, 22(6).

Reddy, S.J. 1971. An empirical method for the determination of total solar radiation. Solar Energy Journal, 13, 289.

Satcunanathan, S. 1973. A crop drier utilizing a two pass solar air heater. Presented at International Congress: the Sun in the Service of Mankind, 2–6 July 1973, Paris, France.

Selçuk, M.K. et alii. 1974. Development, theoretical analysis and performance evaluation of shelf type solar dryers. Solar Energy Journal, 16, 81.