



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.

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, transferencia 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 la deshidratación, problemas que presenta la rehidratación y problemas resultantes del almacenamiento del producto deshidratado. La sección de aceptación 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 control bajo transferencia 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, así como el de la madera como fuentes de calor para procesos de deshidratación. Se efectúa 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 (<i>papa seca</i>) 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 dessiccation 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, 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.

Le séchage solaire et à l'air libre du paddy en Corée

Hak Kyun Koh et Chang Joo Chung¹

Résumé On a voulu apprécier les avantages respectifs et la faisabilité des procédés de séchage solaire ou de séchage à l'air libre et d'entreposage en silo. On a analysé également les conditions atmosphériques ainsi que divers résultats expérimentaux constatés en Corée entre 1973 et 1980. On a évalué les résultats du séchage solaire à l'air naturel en termes de taux de déshydratation, de variation de l'humidité dans la masse de grain, et de consommation d'énergie par kg d'humidité extrait.

Pour le séchage du paddy on s'est servi de collecteurs solaires avec et sans accumulateur de chaleur. L'exposé examine également la rentabilité du système mis au point.

En Corée, la méthode traditionnelle de séchage du paddy consiste à exposer la récolte au soleil sur le champ avant le battage, et à sécher ensuite le grain battu sur des nattes étendues au soleil. La méthode est laborieuse et soumise aux caprices atmosphériques ; elle entraîne presque fatalement des pertes considérables de riz, tant en quantité qu'en qualité. Pour les éviter, on a recommandé d'avancer la moisson et de la faire suivre du battage au champ. Mais surtout, depuis l'introduction en Corée, vers 1969, d'une nouvelle variété à rendement élevé, l'urgence s'est fait sentir d'améliorer les procédés de séchage afin de réduire les pertes dues au clivage des grains. Pour répondre au nouveau mode de récolte avec moissonneuse-batteuse ou lieuse, l'on doit disposer d'un moyen de sécher convenablement une masse considérable de riz à fort contenu humide, moyen auquel ne répond pas le séchage au soleil que les cultivateurs coréens pratiquent traditionnellement.

Le principe du séchage à l'air et de l'application de l'énergie solaire a fait l'objet de beaucoup d'intérêt au cours des dernières années, en raison surtout des conditions atmosphériques favorables, à l'époque de la moisson en Corée. De plus, l'application de l'énergie solaire au séchage du grain semble convenir le mieux à des systèmes à température peu élevée. Et, enfin, le procédé de séchage en silo exposé dans ces pages offrira

l'avantage d'être, en même temps, un mode d'entreposage prolongé et perfectionné du grain.

Notre intention était d'apprécier la faisabilité du séchage solaire et à l'air avec conservation du grain en silo, dans des installations adaptées à l'échelon de la ferme. A cette fin, nous avons dû résumer et analyser les conditions atmosphériques, l'humidité relative et la température moyenne ainsi que divers résultats d'expériences réalisées en Corée, de 1973 à 1980, sur le séchage solaire et à l'air.

Analyse des conditions atmosphériques dans le séchage à l'air

Dans les systèmes de séchage à air, le mode d'aération et la circulation de l'air indispensable dépendent des conditions atmosphériques et de la teneur en humidité (TH) initiale du grain. C'est pourquoi la faisabilité du séchage et de l'entreposage en recourant à l'air doit être abordée en s'inspirant d'une analyse de ces conditions. Si ces dernières, à l'époque habituelle des moissons, sont favorables à un bon séchage, on adoptera de préférence la méthode naturelle, autrement on devra recourir à l'air chaud. On peut évaluer le potentiel de séchage de l'air en mesurant l'humidité relative (RH) et la température à l'aide d'un thermomètre à boule sèche. Pour estimer ce potentiel de façon raisonnable, on doit préalablement analyser les relevés atmosphériques d'une période prolongée.

Les enquêteurs chargés des expériences de séchage à l'air entre 1973 et 1980 ont donc analysé

1. Division of Agricultural Machinery and Process Engineering, Department of Agricultural Engineering, College of Agriculture, Seoul National University, Suwon, Korea 170.

ce genre d'informations couvrant une période de 10 ans, pour obtenir la température et l'humidité relative moyennes dont dépendrait le potentiel de séchage naturel. Leur étude a révélé que la température moyenne en octobre variait de 13 à 16,8 °C, et l'humidité relative de 64 à 76 %. Les moyennes relevées dans 14 endroits, pour le mois d'octobre étaient, respectivement, de 14,9 °C et de 69,4 %.

D'après ces analyses, les chiffres obtenus indiquaient un bon potentiel de séchage, parce que à cette même époque la teneur en humidité d'équilibre (TH_e) des grains était d'environ 15 %. On notera cependant que les températures idéales ne se succédaient pas toujours pendant des jours consécutifs et qu'il fallait parfois interrompre le séchage par suite du temps défavorable.

Dans l'analyse des données atmosphériques, l'humidité relative a été considérée comme le facteur le plus important pour le séchage à l'air. Kim (1974) estimait à 75 % la teneur relative critique (HR_c). À partir de cette hypothèse, il a analysé les relevés atmosphériques et rapporté que la durée quotidienne optimale du séchage dans la région de Suweon était de 9 heures. Pendant ce laps de temps, la température moyenne se maintenait entre 13 et 17,4 °C et l'humidité relative à 66 %. Ces conditions ont été qualifiées de si favorables au séchage que le contenu humide du grain a pu être réduit à 14,2 %, base humide (bh). En admettant que toute journée ayant un taux d'humidité relative de plus de 75 % pendant au moins 3 heures était impropre au séchage, Kim a également rapporté 4 jours de non-séchage en octobre pour la région de Suweon. Dans une autre analyse de Kim et alii (1980), on a aussi relevé 4 jours non utilisables en octobre dans la région de Taegu. Ces observations semblent indiquer que les conditions atmosphériques en Corée, à l'époque de la moisson, offrent d'excellentes possibilités au séchage à l'air.

Analyses d'expériences avec le séchage à l'air

La question de savoir si une installation de séchage et d'entreposage en silo à l'air ambiant est réalisable dans une région agricole particulière, ne peut se résoudre que par des études expérimentales de longue durée. Le succès du séchage à l'air et de l'entreposage en silo dépend en effet des conditions atmosphériques annuelles dans ladite région. L'évaluation technique d'une installation de ce genre doit s'effectuer également d'après les résultats expérimentaux recueillis. Le tableau I résume ceux que l'on a obtenus des expériences

de séchage à l'air analysées dans cette étude. Comme on le voit dans le tableau, six de ces expériences ont recouru aux mêmes méthodes et ont donné des résultats identiques. Toutes ont eu lieu en octobre, la période de séchage durant environ 10 à 15 jours.

Dans les expériences B, D, E et F, le contenu humide des grains a pu être ramené à 15 %, c'est-à-dire dans les limites jugées satisfaisantes pour un bon entreposage. Par contre, dans les expériences A et C, ce contenu n'a pu descendre à 15 % pendant la période de séchage, le volume d'air mis en circulation étant inférieur à celui des autres expériences dans les deux cas.

Le taux de déshydratation moyen durant la période de séchage a été de 0,03 à 0,11 % par heure de fonctionnement du ventilateur. Ce taux a varié selon que ce fonctionnement était continu ou intermittent. D'autres différences significatives se sont également manifestées entre le stade initial et le stade final du séchage.

Des variations similaires ont été observées dans la teneur moyenne en humidité durant la période de séchage, bien que certaines soient attribuables à la région et au temps. La différence dans la teneur finale en humidité (TH_f) entre les couches supérieure et inférieure du grain est demeurée en deçà de 1 %, et le séchage a progressé uniformément du bas vers le haut. Aucun gradient d'humidité n'a été observé dans le sens radial à l'intérieur du silo à grain. En conséquence, le séchage à l'air avec usage d'un silo pourrait s'avérer un procédé très efficace pour le grain, bien que la période du séchage soit assez longue.

Expérience d'entreposage

Comme il a été mentionné plus haut, le silo à grain joue à la fois le rôle de séchoir et de magasin. Une expérience a eu lieu en trois endroits sur du paddy, comportant dans les trois cas l'analyse des variations de température et du contenu humide du grain, considérées comme facteurs importants pour un entreposage sécuritaire du paddy.

Entre mars et juillet 1979, la température moyenne du paddy entreposé a augmenté de 3 à 30 °C et a généralement dépassé la température ambiante, comme le montre la figure 1. Cette élévation était attribuable à la chaleur de respiration du grain brut et à la transmission par convection de la chaleur provenant de l'extérieur du silo. Durant cette période, la teneur en humidité moyenne est passée graduellement de 13,5 à 15,3 %. En règle générale au cours de l'hiver, on n'a guère constaté de variation de la température

Tableau 1. Résumé des expériences de séchage à l'air.

	No des expériences					
	A	B	C ^a	D	E	F
Surface de la section transv. du silo (m ²)	3,8 (ø2,2 m)	3,14 (ø2,0 m)	2,25 (1,5 × 1,5 m)	2,01 (ø1,6 m)	4,33 (ø2,35 m)	7,1 (ø8,0 m)
Hauteur du silo (m)	1,8	1,8	1,8	1,2	1,2	2,5
Matériaux du silo	acier	acier	contreplaqué	acier	acier	acier
Quantité de paddy (t)	3,6	2,0	1,7	1,0	2,3	4,2
Variétés de riz	Tong-il	Milyang 23	Jinhung	Milyang 23	Suweon 264	Milyang 30
Épaisseur de la couche de paddy	1,6	1,1	1,35	1,1	0,9	0,9
Circulation d'air (cm/m ³)	2,8	4,0	1,64	3,60	3,60	4,81
Période de séchage	13/10/73- 02/11/73	30/09/78- 12/10/78	14/10/78- 03/11/78	01/10/79- 12/10/79	15/10/79- 24/10/79	15/10/80- 28/10/80
Teneur en humidité initiale (% bh)	22,2	20,0	24,8	19,8	20,0	24,4
Teneur finale en humidité (% bh)	16,7	14,0	15,1	13,7	13,0	15,0
Fonctionnement du ventilateur (heures)	107	210	325	207	66	288
Taux de séchage moyen (%/heure)	0,05	0,03	0,03	0,03	0,11	0,03

a) Dans toutes les expériences on s'est servi d'un silo rond en tôle d'acier, à l'exception de C qui utilisait un silo rectangulaire en contreplaqué.

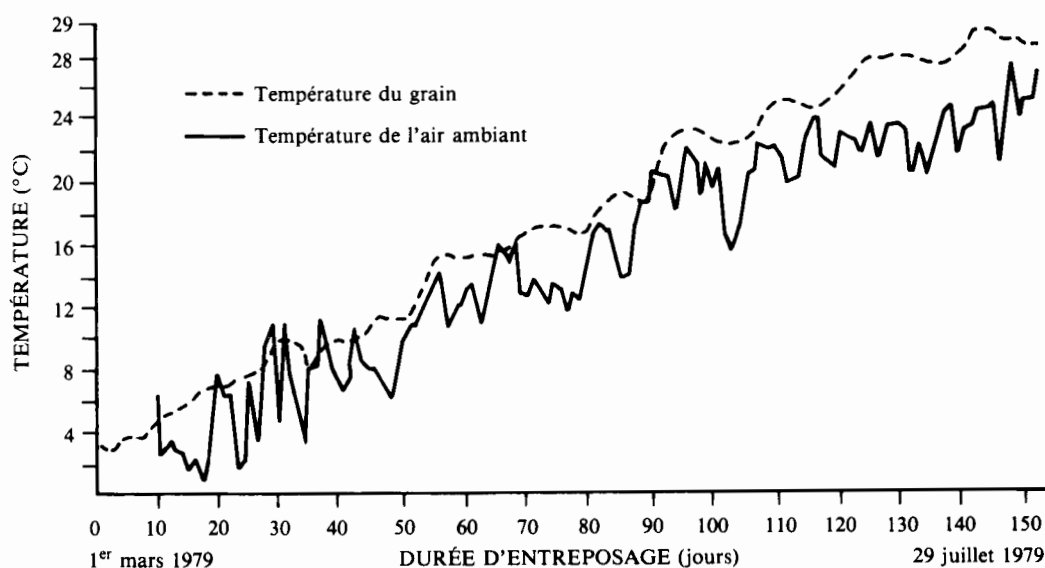


Fig. 1. Variations des températures moyennes de l'air ambiant et du grain pendant l'entreposage (expérience B).

du grain ni de sa teneur en humidité à l'intérieur du silo, mais la différence a été considérable durant l'été. Kim (1974) a signalé le problème soulevé par cette différence. Cependant, Chung et Koh (1980) ont démontré dans leur expérience que l'entreposage estival pouvait se révéler satisfaisant même sans aération.

L'essai de meunerie a été effectué après la fin des expériences d'entreposage. Il a démontré que la récupération de riz brun, de riz de meunerie et de riz de première qualité s'élevait, respectivement à 79,9, 72,8 et 63,63 %, indiquant par là que le paddy avait conservé durant son entreposage une qualité conforme au critère de premier degré.

Après la fin de l'expérience B, on a effectué un autre test d'entreposage en utilisant le même silo et le même paddy que dans B. Durant la période de conservation, du milieu d'octobre 1979 au milieu de mai 1980, la teneur moyenne en humidité du paddy s'est maintenue dans les limites de 12,5 à 13,7 %, donc très satisfaisante pour assurer une bonne préservation. Le test de meunerie, suivant l'expérience d'entreposage a procuré une récupération de 80 % de riz brun, 73 % de riz de meunerie et 64 % de riz de première qualité. Ces résultats démontrent que la qualité du paddy durant son entreposage s'est maintenue dans les limites du critère de premier degré. On n'a observé aucun dégât imputable aux insectes ou aux moisissures.

Analyse du prix de revient

Comme on le constate d'après les paragraphes précédents, le séchage et l'entreposage en silo du paddy, en Corée s'est avéré vraiment pratique. Encore faut-il, outre les avantages techniques du procédé, en considérer la faisabilité économique. Malheureusement, on ne connaît aucune autre méthode peu coûteuse comparable au procédé expérimenté. Dans la plupart des régions, le séchage traditionnel au soleil reste la règle. Bien que moins coûteux, il expose le grain à des dégâts qualitatifs et quantitatifs, les opérations subissent de fréquentes interruptions dues aux changements de temps inattendus et à des difficultés dans la mécanisation des moissons. Ces difficultés compliquent les possibilités de comparaison entre le séchage à l'air libre et le séchage en silo.

On n'a pas tenu compte dans cette étude des séchoirs circulaires dont il n'existe que peu d'exemplaires en usage. On s'est donc limité aux coûts du séchage en silo. Dans cette expérience le coût total du séchage d'une tonne de paddy, d'une humidité initiale (TH) de 20 % jusqu'à 14 %, s'est élevé à 40000 won (685 KRW = 1,00 \$US). Les

frais fixes ont été de 32300 KRW (80 %) et les dépenses variables de 7700 KRW (20 %). Les frais fixes (surtout immobilisations) constituent une proportion très élevée du coût total, que l'on pourrait réduire de plus de moitié en portant la capacité du silo à 2 t et en l'utilisant deux fois par année. Si l'on pouvait abaisser le prix des silos par une production en série, le coût du séchage serait encore plus réduit. A l'heure actuelle, les frais d'exploitation d'un séchoir circulaire en usage dans les régions agricoles s'élèvent à 600 KRW par sac du paddy, soit l'équivalent d'environ 12000 KRW/tonne. Compte tenu de ses autres avantages, comme la qualité de conservation du grain, on peut estimer que le recours au silo s'affirme comme économiquement raisonnable.

Analyse d'expériences de séchage au soleil

Il a été procédé en trois endroits à des expériences de séchage du paddy au soleil. Le même silo à grain utilisé lors de l'expérience de séchage à l'air a servi également aux expériences de séchage à l'air chauffé par le soleil. Le tableau 2 reproduit les résultats de cette série d'expériences.

La figure 2 montre le dispositif de séchage supplémentaire dont on s'est servi dans l'expérience B. Il se compose d'un collecteur de l'énergie solaire à sole plate et d'un accumulateur de chaleur. Dans ce système, une masse de pierres de 7,2 m³ empilée sur un conduit perforé à l'intérieur du collecteur se réchauffait pendant le jour, et la chaleur ainsi absorbée se transmettait ensuite, durant la nuit, à l'air de séchage. Les collecteurs utilisés dans les expériences C et E comportaient un recouvrement de plastique transparent et un absorbeur en métal noir. Dans l'expérience C, on y trouvait un couvercle ovale et un collecteur absorbeur plat (Fig. 3) tandis que dans l'expérience E le couvercle était plat et l'absorbeur triangulaire. Aucun accumulateur de chaleur n'étant prévu dans ces systèmes, les collecteurs ne servaient à chauffer l'air que durant la journée.

Performance des collecteurs solaires

La performance des collecteurs solaires utilisés dans chacune des expériences a été analysée en fonction de l'élévation de température de l'air de séchage et de l'efficacité du collecteur solaire. De façon générale, les variations de température de l'air durant une journée typique, dans l'ex-

Tableau 2. Résumé des expériences de séchage du paddy à l'air chauffé par le soleil.

	No des expériences		
	B	C	E
Quantités de paddy (t)	2,0	1,7	2,3
Volume d'air en circulation (cm ³ /m ³)	4,0	1,6	3,6
Période d'expérience	01/10/78-11/10/78	10/10/78-24/10/78	15/10/79-31/10/79
Teneur initiale en humidité (% bh)	19,8	21,9	25,6
Teneur finale moyenne en humidité (% bh)	13,3	13,7	11,2
Durée totale de fonctionnement du ventilateur (heures)	140	130,4	96
Taux de séchage moyen (%/heure)	0,05	0,06	0,15
Consommation d'énergie par 1 % de réduction de la TH (kWh) (séchage à l'air naturel)	7,69 (9,70)	6,29 (13,64)	5,33 (7,54)
Teneur finale en humidité de la couche supérieure (% bh)	13,4	15,1	14,4
Teneur finale en humidité de la couche inférieure (% bh)	12,9	10,2	10,0
Fonctionnement quotidien du ventilateur (heures)	24 heures	8:00-20:30	10:00-17:00

périence B, ont indiqué que l'air chauffé par le tas de pierres atteignait sa température maximale vers 14 heures et son minimum vers 19 heures. Cette tendance s'est retrouvée durant toute la durée de l'expérience. Pour le système donné, la température de l'air traversant le conduit s'est élevée en moyenne d'environ 4 °C durant la nuit par rapport à celle de l'air ambiant, et d'environ 8 °C pendant le jour.

Dans l'expérience C, l'élévation de température de l'air durant l'expérience de séchage solaire

a été de l'ordre de 6,5 à 21,8 °C. Le maximum atteint a été de 40 °C et le minimum de 13,2 °C. L'expérience E a révélé les mêmes variations de température. La moyenne pour la période entière du séchage a été de 15,3 °C, ce qui a pu faire baisser l'humidité relative de 63,4 à environ 40 %, en moyenne. L'air chauffé possédant un tel potentiel desséchant, avec sa température élevée et sa faible humidité relative, risque cependant de causer un séchage irrégulier et du surséchage dans le cas de systèmes de séchage à basse température, en silo.

Le rendement du collecteur durant une journée typique de chaque expérience a été calculé en fonction du rapport existant entre l'énergie captée et la radiation utilisable. La quantité d'énergie captée était établie en mesurant le volume et l'élévation de la température de l'air. Les rendements calculés des collecteurs se sont révélés de l'ordre de 35 % dans l'expérience B, de 46,1 % dans l'expérience C, et de 43,1 % dans l'expérience E.

Analyse du séchage solaire

Dans cette section, on comparera les variations d'humidité du grain avec apport d'énergie électrique dans l'équipement de séchage solaire, et celles du séchage à l'air. La figure 4 présente les courbes de séchage du grain situé dans les couches du haut, du milieu et du bas avec l'air de séchage provenant du système à collecteur solaire et accumulateur de chaleur de l'expérience B (Fig. 5 et 6). Durant toute la période du séchage, il a existé quelques gradients d'humidité du grain dans chacune des couches. Toutefois, le gradient allait en diminuant à mesure que le séchage avançait, et la différence du contenu humide entre les couches du haut et du bas a été inférieure à 2 % une fois que la teneur en humidité du grain (TH_g) eût atteint environ 13,3 % de moyenne après 5 jours de séchage.

En comparant les courbes du séchage à l'air moyen avec et sans apport de chaleur supplémentaire, on constate un taux de séchage beaucoup plus élevé avec les séchoirs solaires et moins de temps de séchage nécessaire pour parvenir à la teneur finale en humidité recherchée. Cependant, la comparaison a également fait ressortir un gradient d'humidité légèrement plus élevé entre les couches du haut et du bas durant toute la durée de l'expérience.

Les modifications constatées dans le contenu humide aux divers niveaux de la masse de grain, dans l'expérience B, indiquent que l'apport de l'énergie solaire durant le jour a pu augmenter d'environ 12 % la différence de la teneur humide

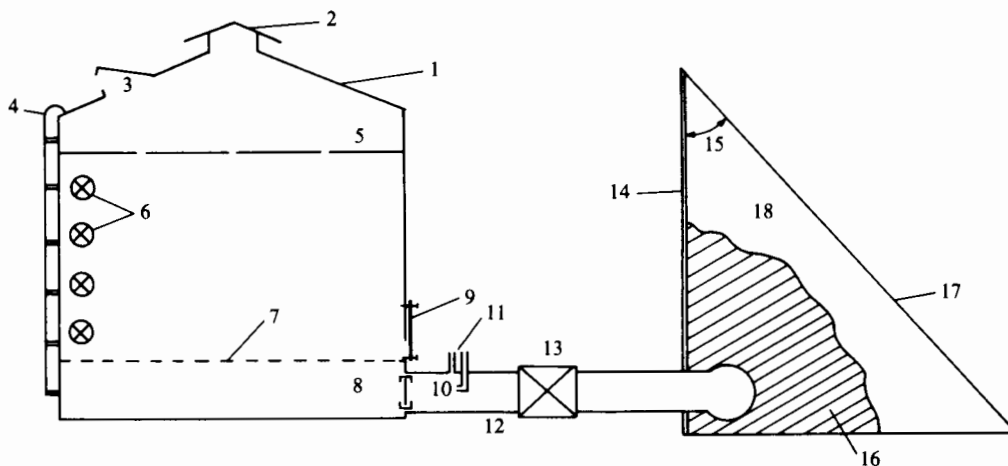


Fig. 2. Schéma du système de collecteur et accumulateur de chaleur solaire relié au silo à grain (expérience B) : (1) silo à grain, (2) ventilateur, (3) ouverture de visite, (4) échelle extérieure, (5) surface du grain, (6) orifices pour prélèvements, (7) plancher perforé, (8) anémomètre, (9) sortie, (10) tube de pression statique, (11) manomètre, (12) conduit d'aération, (13) ventilateur et moteur, (14) paroi isolante, (15) angle à 48°, (16) tas de pierre, (17) plaque avec recouvrement en vinyle, (18) collecteur solaire.

entre le grain à l'entrée et à la sortie de l'air, même si la teneur moyenne s'est élevée à 15 % après 69 heures de séchage. Il a fallu 96 heures pour sécher le grain au degré nécessaire à une bonne conservation, soit 14,4 % d'humidité à la couche supérieure, mais la différence d'humidité a été de 4,4 % à la fin du séchage. Cette différence entre les couches est attribuable à la température élevée de l'air entrant et à son faible taux de circulation. Le fonctionnement continu du ventilateur pendant la nuit, lorsque l'humidité relative de l'air ambiant est élevée, peut contribuer à maintenir un contenu humide uniforme dans toute la masse du grain.

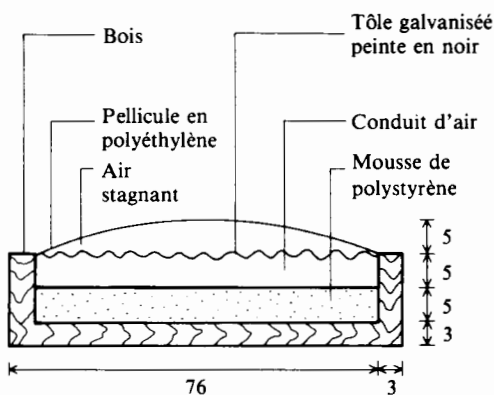


Fig. 3. Coupe d'un collecteur solaire (expérience C) (en centimètres).

Le même régime de séchage s'est manifesté dans l'expérience C, où le ventilateur a été en marche entre 8 heures et 20 h 30, c'est-à-dire plus longtemps que dans l'expérience E. La teneur humide moyenne a été de 13,7 % et la différence entre les couches du haut et du bas a été d'environ 5 % à la fin du séchage. On a également relevé un séchage inégal ainsi qu'un surséchage du grain dans cette expérience.

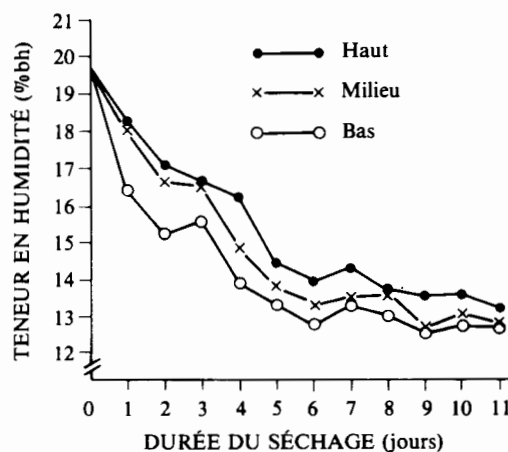


Fig. 4. Changement de la teneur en humidité de chaque couche de paddy séché à l'air chauffé par le soleil.

Tableau 3. Consommation d'énergie par kg d'eau enlevé.

	Expérience B		Expérience C		Expérience E	
	Air libre	Solaire	Air libre	Solaire	Air libre	Solaire
Teneur en humidité (% bh)						
Initiale	20,2	19,8	24,8	21,9	20,0	25,6
Finale (moyenne)	13,6	13,3	15,1	13,7	13,0	11,2
Consommation totale d'énergie (kWh)	64	50	132,3	51,6	52,8	76,8
kWh/kg d'humidité	0,418 (100)	0,333 (79,7)	0,678 (100)	0,320 (47,2)	0,285 (100)	0,206 (72,3)

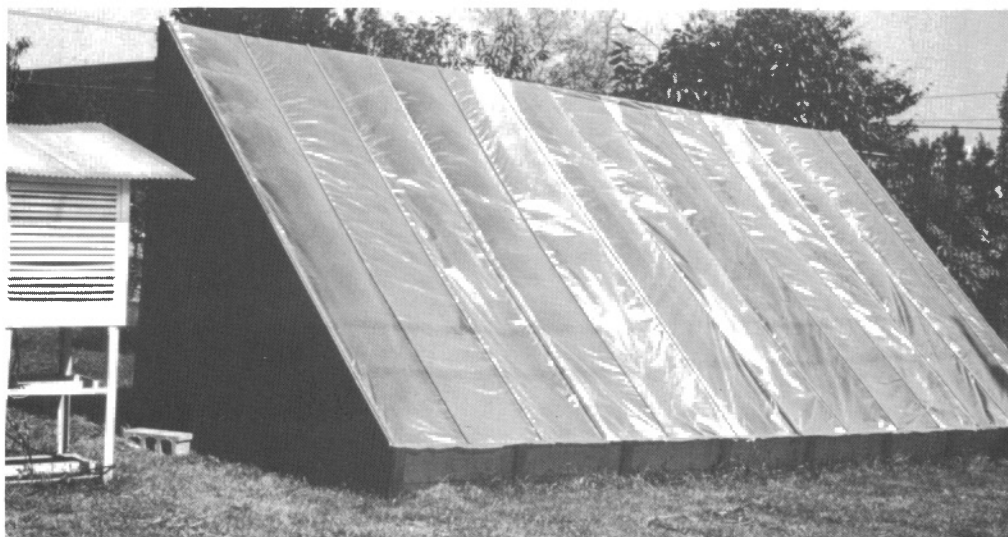


Fig. 5. Collecteur solaire avec accumulateur thermique pour le séchage solaire (expérience B).

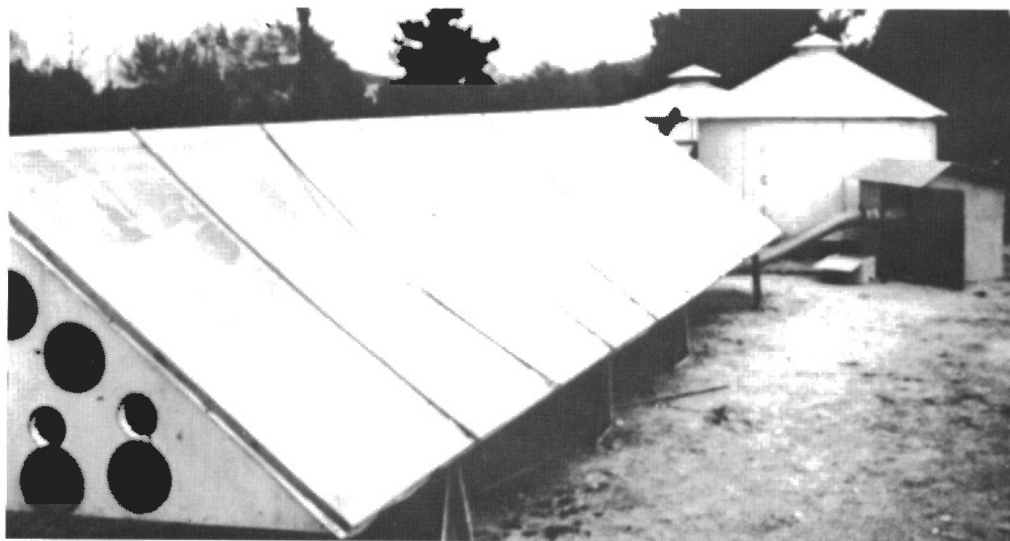


Fig. 6. Collecteur solaire sans accumulateur thermique pour le séchage solaire (expérience C).

L'énergie nécessaire

Le tableau 3 résume les besoins en énergie électrique de chacune des expériences de séchage. En général, la consommation d'énergie par kg d'eau enlevé a été inférieure de 20 à 50 % pour le séchage à l'air chauffé par le soleil comparativement au séchage à l'air libre. L'expérience C a consommé plus d'énergie électrique que les deux autres, en raison du taux inférieur de sa circulation d'air.

D'après les analyses on devra se rappeler que, dans les conditions de fonctionnement et d'air ambiant propres aux expériences B et E, on ne pouvait guère obtenir beaucoup d'économie dans l'apport d'énergie ni beaucoup d'avantage pour le séchage du grain, en ajoutant le dispositif de chauffage solaire. Cependant, on ne saurait sous-estimer la valeur du collecteur solaire lorsque les conditions de séchage sont défavorables. C'est pourquoi d'autres études s'imposent à l'avenir pour mettre au point un dispositif de chauffage d'appoint, adaptable au système de séchage à basse température du grain conservé. On devra s'efforcer également d'abaisser le coût du collecteur solaire et d'en prolonger la durée.

Conclusion

La Corée a grand besoin d'améliorer les techniques en usage pour le séchage et l'entreposage du grain à l'échelle de la ferme. Compte tenu des difficultés d'approvisionnement et du prix élevé des combustibles fossiles ainsi que des restrictions frappant la consommation d'énergie, l'utilisation de l'énergie solaire pour le séchage des grains acquiert de plus en plus d'importance.

L'étude qui précède avait pour but d'apprécier la faisabilité technique du séchage et de l'entreposage combinés, en silo, en recourant à l'air chauffé par le soleil, en profitant d'expériences déjà effectuées. D'après les résultats obtenus de ces dernières, on peut actuellement formuler les conclusions suivantes :

- Les conditions atmosphériques à l'époque du séchage du paddy (octobre) en Corée semblent bien se prêter au séchage à l'air.

- En recourant à l'air pour le séchage en silo, on a pu ramener, en 3 semaines, des quantités de 1 à 4 tonnes de paddy à un degré d'humidité compatible avec un bon entreposage. Cette méthode a également produit un séchage uniforme.

- Dans les deux expériences d'entreposage, la teneur en humidité du paddy s'est maintenue en deçà de 14 % (bh) durant la période de conservation. La qualité du grain ne s'est en aucune façon détériorée.

- Le séchage à l'air chauffé par le soleil a contribué à réduire la teneur humide finale du paddy, à abréger la durée du séchage et à diminuer l'énergie nécessaire pour une quantité donnée d'eau évacuée, comparativement au séchage à l'air libre. Avec les collecteurs solaires, une forte élévation de température de l'air de séchage produit une déshydratation inégale et un surséchage du paddy ; on cherchera donc à obtenir un ensemble économique et durable de collecteur solaire et d'accumulateur de chaleur adaptable au séchage en silo à température peu élevée.

- Le coût d'un système de séchage en silo semble avoir dépassé celui du séchage traditionnel au soleil. Cependant, il paraît avoir des avantages en évitant par exemple le surséchage, en conservant un grain de bonne qualité et en assurant la sécurité de l'entreposage. Si l'on tient compte de ces avantages, et si l'on parvient à réduire les dépenses fixes afférentes au séchage en silo tout en augmentant la capacité de ce dernier et sa fréquence d'utilisation au cours de l'année, le séchage en silo a de bonnes chances de s'avérer économiquement pratique.

Chung, C.J. et Koh, H.K. 1980. Experimental study on the in-bin drying with natural and solar-heated air and storage of rough rice. *Journal of Solar Energy Society of Korea*, 3(2).

Kim, S.R. 1974. Study on the small grain bin for the improvement of grain drying and storage. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 16(1).

Kim, J.Y., Suh, S.D., Keum, D.H. et Lee, S.K. 1980. Investigation of natural air drying of rough rice based on the weather data in Taegu area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Machinery*, 5(1).