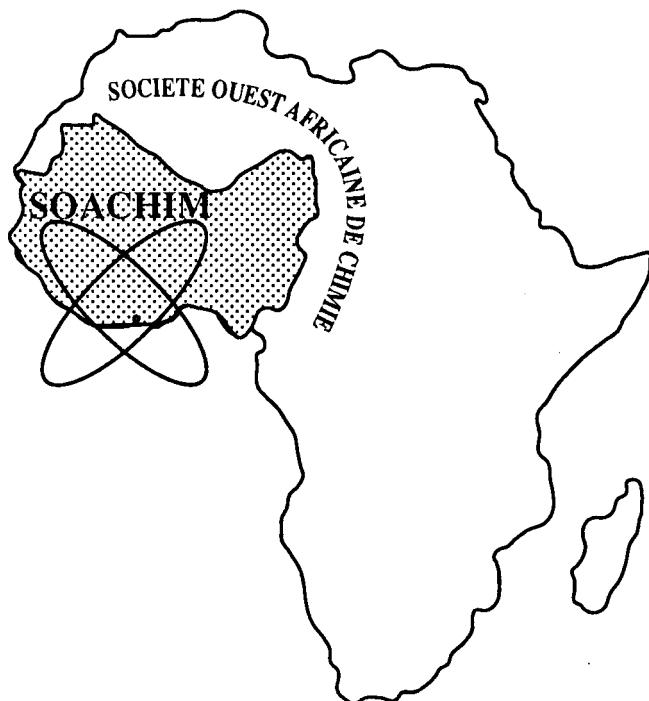


Séchage solaire de céréales : cinétiques, évaluations thermo-hygrométrique et énergétique

Tchamye Tcha-Essو BOROZE, Yaovi Ouézou AZOUМА,
Koffi Fafadji Ahanogbe, Mohamed Barate

Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie

J. Soc. Ouest-Afr. Chim.(2018), 046 : 41 - 49
23^{ème} Année, Décembre 2018



ISSN 0796-6687

Code Chemical Abstracts : JSOCF2

Cote INIST (CNRS France) : <27680>

Site Web: <http://www.soachim.org>

Séchage solaire de céréales : cinétiques, évaluations thermo-hygrométrique et énergétique

Tchamye Tcha-Essو BOROZE*, **Yaovi Ouézou AZOUMA**, **Koffi Fafadji Ahanogbe**,
Mohamed Barate

Equipe de Recherche sur la Mécanisation Agricole et le Génie des Procédés (ERMAP), Laboratoire d'Energie Solaire (LES), Université de Lomé, 01 BP 1515 Lomé 01 – Togo

(Reçu le 15/06/2018 – Accepté après corrections le 21/01/ 2019)

Résumé : Le séchage permet de stabiliser les produits de récolte avant leur conservation [1]. Sa non-maîtrise entraîne d'énormes pertes post-récoltes évaluées à 25% pour les céréales par la FAO [2]. Ce travail vise la réduction de ces pertes par l'utilisation d'un dispositif de séchage serre. Pour ce faire, les cinétiques et les performances énergétiques de différents dispositifs de séchage de céréales sont étudiées [3-5]. Spécifiquement, nous avons effectué des essais comparatifs de séchage du maïs puis du riz paddy IR 841 sur une bâche, une dalle et dans une maquette fonctionnelle de séchoir serre. Les résultats obtenus montrent qu'avec un débit d'air de 1,08 kg/s, la température maximale atteint 51°C pour le maïs et 59°C pour le riz dans le séchoir serre contre 35 °C et 38°C, à l'air libre, respectivement pour le maïs et le riz. Ces céréales sèchent plus vite sous le séchoir serre (5h à 6h) qu'à l'air libre (7h à 9h). Le rendement de captation du séchoir serre est évalué à 63% et le rendement de séchage à 30% en convection forcée, contre 6% et 7% respectivement pour la bâche et la dalle. En outre, le séchoir serre a l'avantage de la protection des produits contre diverses contaminations, l'attaque des animaux et les intempéries.

Mots clés : céréales, séchoir serre, cinétique de séchage, efficacité énergétique

Cereal solar drying: kinetics, thermo-hygrometric and energy evaluations

Abstract: Drying stabilizes harvest products before they are stored [1]. Its non-control leads to enormous post-harvest losses estimated at 25% for cereals by the FAO [2]. This work aims at reducing these losses by using a greenhouse drying device. To do this, the kinetics and energy performance of different devices of cereal drying are studied [3-5]. Specifically, we performed comparative tests of corn drying and paddy rice IR 841 on a tarpaulin, a slab and in a model greenhouse dryer. The results obtained show that with an air flow rate of 1.08 kg/s, the maximum temperature reaches 51 °C for maize and 59 °C for rice in the dryer against 35 °C and 38 °C, in the open air, respectively for maize and rice. These cereals dry faster under the greenhouse dryer (5 hrs to 6 hrs) than in the open air (7 hrs to 9 hrs). The solar energy collecting efficiency of the greenhouse dryer is evaluated at 63% and the drying efficiency at 30% in forced convection, compared to 6% and 7% respectively for the tarpaulin and the slab. In addition, the dryer has the advantage of protecting the products against various contaminations, the attack of animals, rain and wind.

Key word: Cereals, greenhouse dryer, drying kinetics, energy efficiency

* Auteur correspondant : T Boroze, E-mail : tchamye@gmail.com

1 Introduction

Le séchage est l'une des méthodes courantes permettant la conservation des produits agricoles^[1]. C'est un procédé simple qui consiste à réduire la teneur en eau des produits permettant ainsi leur conservation sur une longue durée^[6]. Sa non-maîtrise entraîne des pertes post-récoltes estimées à 25% pour les céréales^[2]. En Afrique de l'Ouest, les produits sont séchés en majeure partie de façon traditionnelle^[3, 5]. Cela consiste à étaler le produit agricole à l'air libre aux bords des routes ou sur des bâches, des nattes ou sur des aires cimentées. Ce type de séchage expose les produits aux intempéries, à la poussière, ou aux animaux^[5, 7-10]. Aussi, la qualité organoleptique des produits séchés peut fortement se dégrader.

Pour contribuer à améliorer cette situation, un dispositif de séchage adapté et financièrement accessible aux organisations paysannes est proposé. Ainsi, un séchoir type serre a été conçu et réalisé pour le séchage des céréales en milieu tropical humide^[4]. Cet article présente, les expérimentations sur la maquette fonctionnelle du séchoir type serre pour sécher du maïs et du riz, ainsi que les résultats comparés avec deux dispositifs traditionnels de séchage.

2 Matériels et méthodes d'étude

2.1 Matériels

2.1.1 Matériel végétal

Le maïs utilisé est de la variété "Sotubaka"^[11] et a été cultivé et récolté à la Station d'Expérimentation Agronomique de l'Ecole Supérieure d'Agronomie de l'Université de Lomé (SEA-ESA/UL). Le riz paddy de la variété "IR 841" de la variété *Oryza sativa*^[12] a été acheté directement auprès de riziculteurs dans le village rizicole de Kovié, non loin de Lomé (**figure 1**).

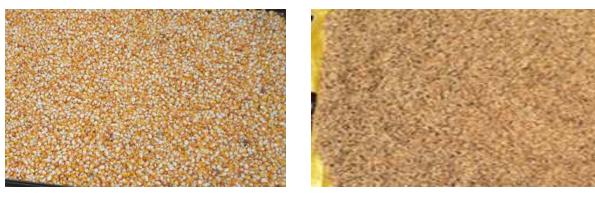


Figure 1 : échantillon de maïs (1) et de riz paddy (2) lors du séchage

2.1.2 Dispositifs expérimentaux

2.1.2.1 La maquette fonctionnelle du séchoir de type serre

Un des dispositifs est une maquette fonctionnelle de séchoir type serre conçue en collaboration avec le

Laboratoire sur l'Energie Solaire de l'UL et réalisée à la SEA-ESA/UL. Elle a une base rectangulaire surmontée d'un toit en forme conique (**figures 2 et 3**). La structure est entièrement recouverte d'un film plastique en polyéthylène sans traitement UV, de 0,1 mm d'épaisseur, avec une transmission au rayonnement solaire incident de 85% et au rayonnement thermique compris entre 30 à 50 %. L'air de séchage (fluide caloporteur) entre dans le séchoir par le côté sud-est vers le bas à travers une ouverture grillagée. Le rayonnement solaire traversant le film en polyéthylène et par effet de serre permet de réchauffer l'intérieur du séchoir (air, produits et matériaux). L'air de séchage, traverse alors le produit en lui cédant de la chaleur et en se chargeant de l'humidité du produit. Cet air humide est extrait du séchoir par un ventilateur centrifuge Sodeka CMP 620-2M de 0,37 kW, monté sur la face nord-ouest, en haut du séchoir (**figure 2 et 3**).

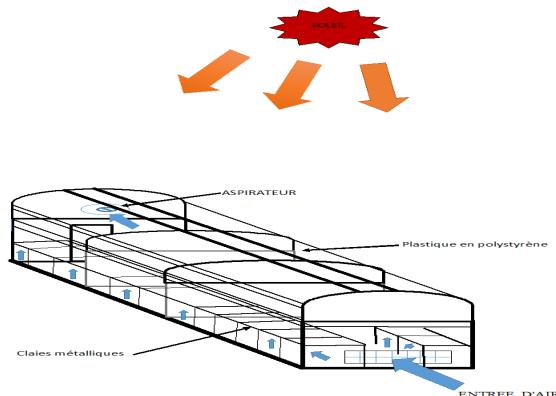


Figure 2 : schéma de principe du séchoir d'étude



Figure 3 : photo de la maquette fonctionnelle du séchoir serre.



Figure 4 : dispositifs de séchage traditionnels : dalle et sac plastique

2.1.2.2 Dispositifs traditionnels

A côté de la maquette fonctionnelle, sont disposés sur le même site, les dispositifs traditionnels de séchage : une aire de séchage sur dalle en béton et sur un sac en plastique (**figure 4**).

2.1.2.3 Matériel de mesure

Le matériel de mesure est présenté dans le **tableau I**.

2.2 Méthode

Avant toute manipulation, le séchoir est nettoyé. Le film en polyéthylène est débarrassé de toute poussière par un lavage à l'eau et l'intérieur du séchoir est soigneusement balayé.

Pour évaluer la teneur en eau des produits au cours du séchage, les masses au cours du séchage de trois (3) échantillons et leurs masses sèches, m_s sont

évaluées sur une balance de précision à 0,001g près. La masse sèche est déterminée après 24 h à l'étuve à 105 °C (**tableau II**).

Pour procéder au séchage, le séchoir est chargé en produit (riz ou maïs) en monocouche le matin vers 8 heures. L'équivalent au chargement en produit d'une claire est exposé à l'air libre sur une dalle et sur un sac en plastique étalé à même le sol (**figure 4**). La variation de la masse de trois claires repérées, une (1) dans chaque compartiment du séchoir (**figure 5**), et celle des produits étalés à l'air libre, sont suivies au cours du séchage grâce à la balance électronique à 0,1g près.

Des mesures de masses sont faites toutes les 30 minutes pendant quatre (4) heures et ensuite chaque heure jusqu'à l'atteinte de l'équilibre.

Tableau I : liste du matériel de mesure utilisé

Désignations	Caractéristiques	Photos
Hygromètre	capacitive de type FH A646-E2C avec une précision de +/- 1,8%	
Thermocouple	Type K de précision +/- 0,05K	
Thermoanémomètre	Type FVA935-TH5 précision +/- 0,2 m/s	
Balance de précision de l'analyseur d'humidité	Type OHAUS MB25	
Balance électronique	Type OHAUS une précision de +/- 0,1g	
Pyranomètre	Type Almelo	
Centrale d'acquisition	Type Almelo 28909 à affichage numérique	

Tableau II : détermination de la masse sèche

Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Masse d'eau évaporée (g)	Taux d'humidité (%)	Taux de masse sèche (%)
20,597	16,492	4,105	19,930	80,07
21,052	16,931	4,121	19,575	80,425
21,938	17,578	4,360	19,874	80,126



Figure 5 : séchoir type serre montrant les claires suivies lors du séchage du maïs et du riz

La température et l'humidité de l'air ont été mesurées dans chaque compartiment du séchoir et à l'air libre à l'aide de capteurs présentés dans le **tableau I**. Le pyranomètre (**tableau I**) a permis de mesurer l'irradiation solaire sur le site d'expérience. L'ensemble de ces capteurs sont connectés à deux centrales d'acquisition de données.

Les expérimentations à vide ont été menées le 08/08/2016. Celles à charge ont été réalisées sous un débit d'air constant de 1,08 kg/s (convection forcée) à l'intérieur du séchoir, la masse volumique de l'air étant prise égale à 1,225 kg/dm³. Les débits d'air dans le séchoir ont été évalués en mesurant la vitesse de l'air soufflé dans le séchoir par le ventilateur centrifuge. Cette mesure a été faite au niveau du conduit d'entrée d'air dans le séchoir. Sur la section droite du conduit, les mesures ont été faites sur l'axe du conduit et en quatre autres points comme le montre la **figure 6**. Nous avons ensuite pris la moyenne de ces mesures que nous avons multipliée par la section pour obtenir la valeur du débit.

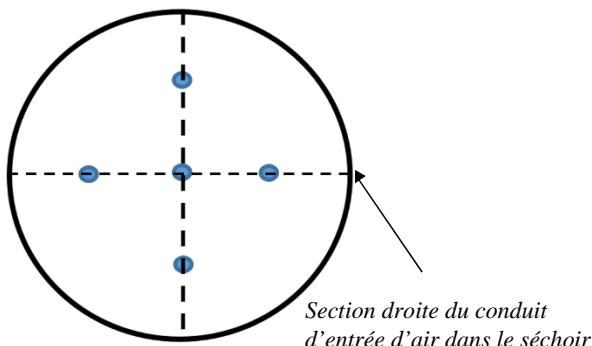


Figure 6 : points de mesure de la vitesse de l'air à la sortie du ventilateur

Les expérimentations à charge ont été effectuées du 23 au 25/12/2016 sur le maïs et du 31/12/2016 au 01/01/2017 sur le riz.

Le suivi de la masse du produit au cours du séchage a permis de calculer les teneurs en eau X_t du produit à l'instant t avec l'équation 1. La vitesse de séchage est évaluée à partir de la teneur en eau à l'aide de l'équation 2 [6].

$$X_t = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X(t+1) - X(t)}{\Delta t} \quad (2)$$

La masse d'eau m_e évaporée du produit d'une teneur en eau X_i vers une teneur en eau X_f dans une masse m_i de produit humide est déterminée à partir de l'équation 3 et permet d'évaluer l'énergie E_V utilisée pour évaporer l'eau du produit (équation 4) [5].

$$m_e = m_i \left(\frac{X_i - X_f}{1 + X_i} \right) \quad (3)$$

$$E_V = m_e L_v \quad (4)$$

L_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, prise égale à 2250 J/kg [13]. L'énergie de l'air du séchage est évaluée à partir de l'équation 5.

$$P(t) = \dot{m} C_p \Delta T \cdot \Delta t \quad (5)$$

Avec \dot{m} le débit massique d'air dans le séchoir, $\Delta T(t)$ la différence de température entre les points de mesure dans le séchoir et l'extérieur (ambiant) instantanée, et Δt la durée de la mesure. La chaleur spécifique C_p est prise égale à 1005 kJ/kg °C.

L'efficacité du séchoir, est évaluée à partir des mesures à vide et à charge. Le rendement évalué à vide permet d'évaluer la capacité du séchoir à emmagasiner de l'énergie dans l'air. L'énergie solaire reçue par le séchoir est calculée à partir de l'équation 6 [5].

$$E_s(t) = I(t) S_{dir} \quad (6)$$

Avec $I(t)$ irradiation instantanée sur le site et S_{dir} la surface directe qui est le projeté au sol du séchoir ou surface de base du séchoir.

L'efficacité du séchoir à vide ou rendement de captation ou rendement thermique du séchoir est donnée par l'équation 7 [12].

$$\varepsilon_{séchoir} = \frac{P(t)}{E_s(t)} \quad (7)$$

Le rendement de séchage du produit par rapport à l'énergie disponible dans l'air est donné par l'équation 8 [5].

$$\varepsilon_{e/s} = \frac{E_V}{E_s} \quad (8)$$

Où E_s est l'énergie solaire reçue par le séchoir pendant la période de séchage.

3 Résultats et discussions

3.1 Résultats des mesures à vide

Les mesures à vide nous ont permis d'avoir les résultats présentés sur les **figures 6 et 7**. Il s'agit de l'irradiation solaire sur le site, des températures et humidité ambiante ainsi que dans le séchoir, la puissance reçue et le rendement du séchoir. L'ensoleillement maximal de ce jour s'élève entre 169 et 1036 W/m². Soit une moyenne journalière de 668 W/m². Cette valeur mesurée est proche de celles des moyennes de saison rapportée par Amou et al (2010) dans la zone tropicale humide du Togo [13]. La température ambiante varie de 30°C à 42,20°C alors qu'elle est comprise entre 33°C et 48,30°C dans le séchoir (**figure 6**). Ces résultats montrent que la température est plus importante dans le séchoir qu'à l'air libre pour les dispositifs traditionnels de séchage. L'humidité dans le séchoir a pu être réduite dans le séchoir à 25% contre des maximums de 61,50% à l'air libre.

Le rendement moyen du séchoir à vide est d'environ 30% (**figure 7**). On observe des maximums à 51,7% réduisant ainsi à 25% l'humidité relative de l'air en son sein. La **figure 7** fait ressortir d'autre part l'efficacité de ce séchoir direct qui par effet de serre transmet de l'énergie à l'enceinte de séchage. Ce séchoir serre arrive à transformer 51,7% de l'ensoleillement en énergie thermique qui servira au séchage. Ce rendement est bien supérieur à celui relevé par Boroze et al [5] sur un séchoir type serre sur le terrain qui est de 19 %.

3.2 Résultats du test à charge en convection forcée

3.2.1 Variation des caractéristiques de l'air au cours du séchage

Les variations de l'irradiation solaire, des températures et humidités à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir serre sont représentées sur les **figures 8 et 9** respectivement lors du séchage du maïs et du riz.

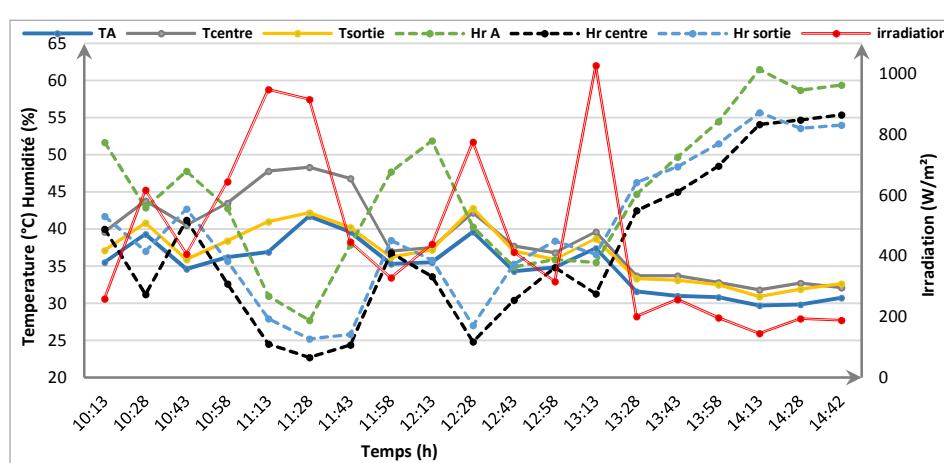


Figure 6 : caractéristiques de l'air et données d'irradiation lors des mesures à vide

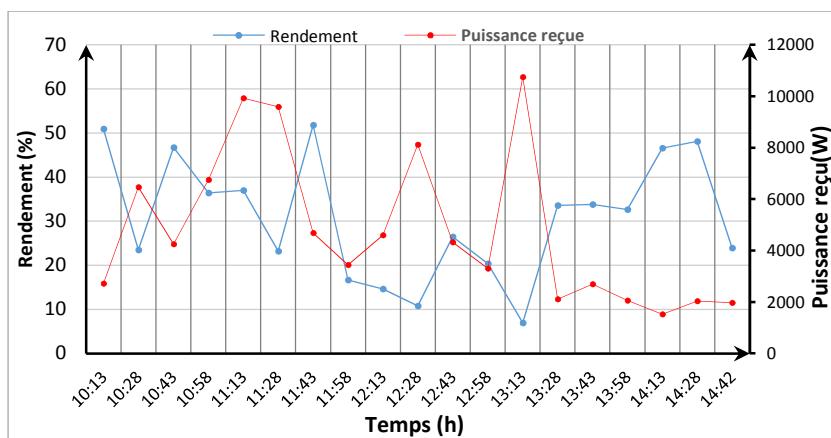


Figure 7 : évolution du rendement de captation du séchoir serre lors du test à vide

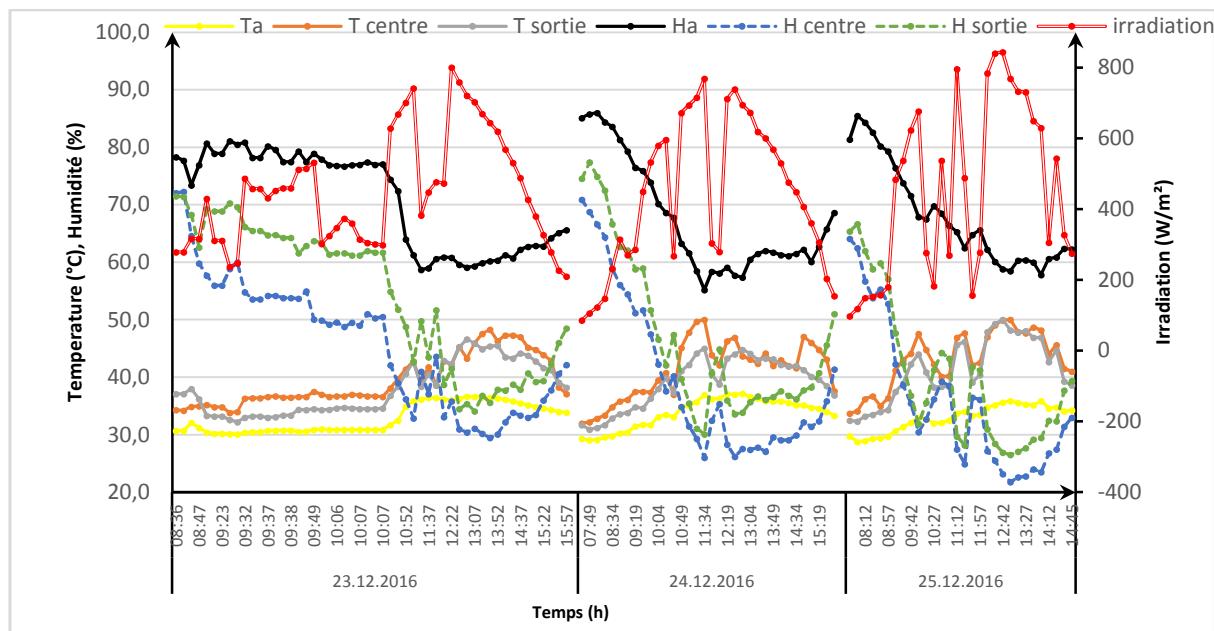


Figure 8 : variation des caractéristiques de l'air de séchage et de l'irradiation solaire dans le séchoir serre lors du séchage du maïs en convection forcée

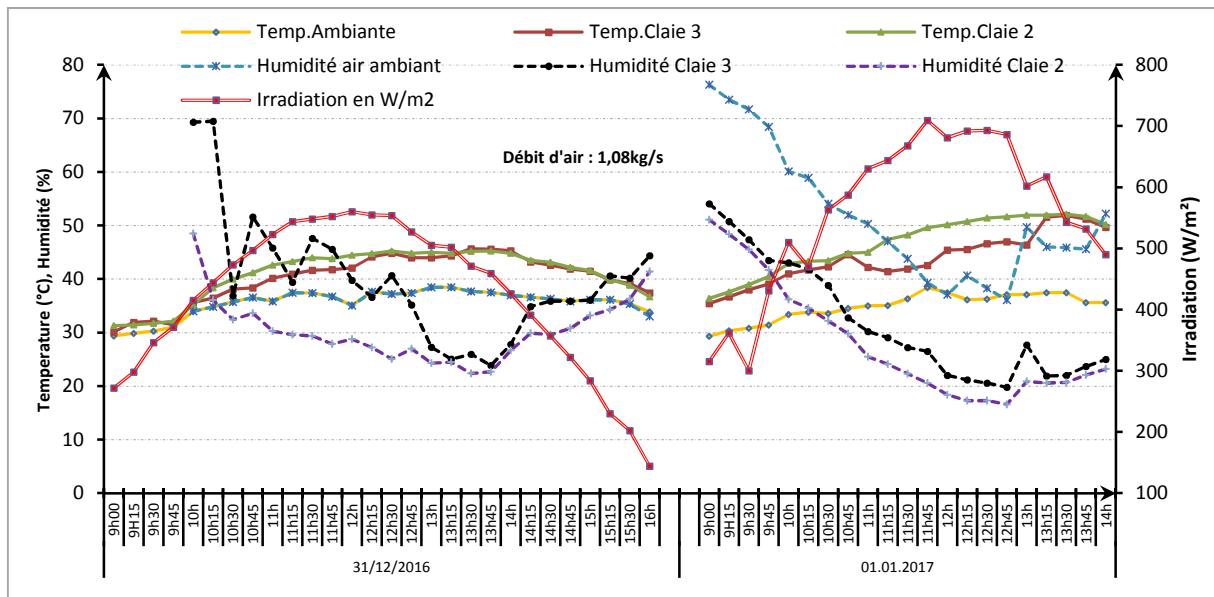


Figure 9 : variation des caractéristiques de l'air de séchage et de l'irradiation solaire dans le séchoir serre lors du séchage du riz en convection forcée

Il ressort que les températures varient suivant l'irradiation. Elles varient de 29,3 °C à 48,0°C hors du séchoir et de 29,6 à 50,7 °C dans le séchoir. Les moyennes de température sont de 37,5°C à l'air libre contre 40,3°C au centre du séchoir. La température à l'intérieur du séchoir n'excède pas 60,0°C, ce qui permet de préserver la qualité du produit agricole à sécher.^[14]

3.2.2 Cinétiques de séchage

Les variations de la teneur en eau en fonction du temps ainsi que celles de la vitesse de séchage sont

représentées sur les **figures 10 et 11** pour le séchage du maïs et du riz respectivement.

Les différentes cinétiques du maïs comme du riz présentent deux phases. La phase à vitesse constante et la phase de ralentissement sont confirmées par les variations de la vitesse en fonction du temps. Cette description correspond à celle des cinétiques de séchage des céréales^[6]. Quelques passages nuageux ont entraînées des baisses momentanées de l'irradiation solaire. Ces variations ont conduit à des réductions de la vitesse de séchage.

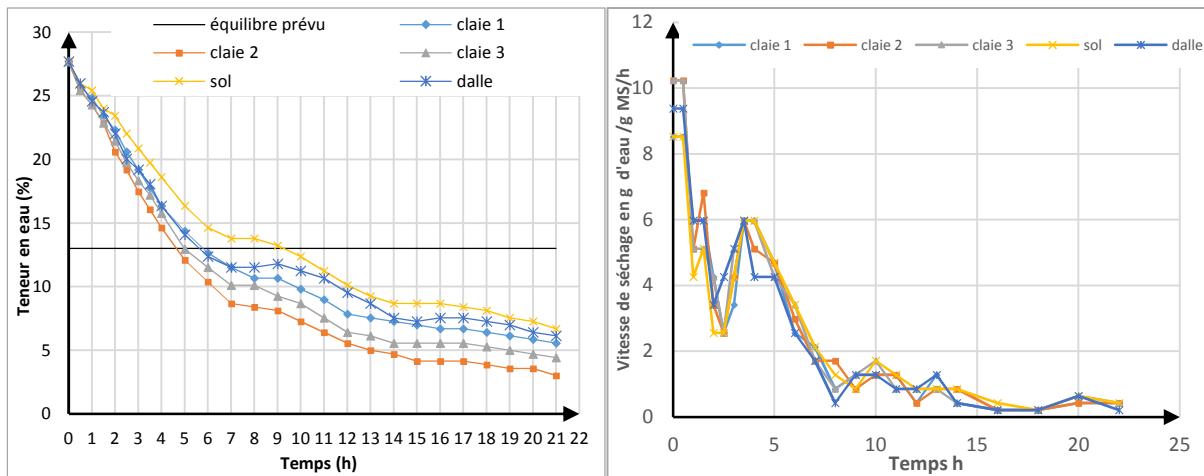


Figure 10 : variations des teneurs en eau et de vitesses de séchage du maïs en convection forcée (1,08 kg/s)

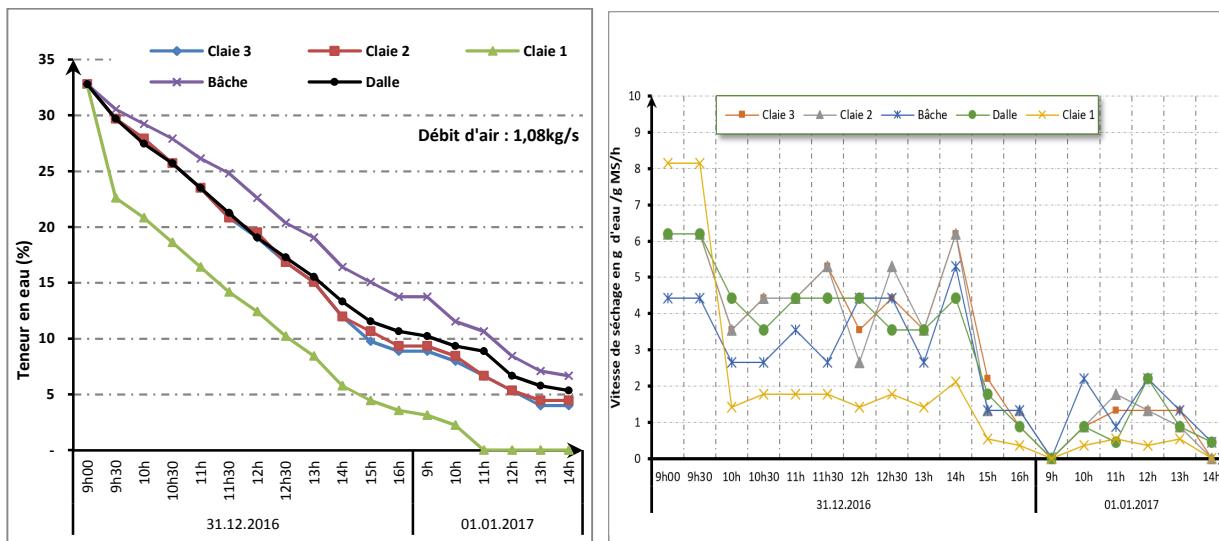


Figure 11 : variations de la teneur en eau et de la vitesse de séchage du riz en convection forcée (1,08 kg/s)

Les cinétiques de séchage du maïs montrent que pour les cliae 1 et 2 du séchoir serre, le temps du séchage est de 5 heures contre 6 heures pour la troisième cliae, 7 h sur la dalle et 9 h sur le sac en plastique à même le sol, soit un rapport de 55% donc un gain de 45% en temps. Ces résultats sont similaires à ceux de Eke et Arinze^[15] qui ont obtenu un gain de 55%.

Pour le séchage du riz, la cliae 1 est toujours la première à sécher après 3 heures de séchage alors que les deux autres cliae (2 et 3) sèchent presque ensemble au bout de 5 heures. Les produits répandus sur la dalle sèchent après 6 heures. Le riz séché sur sac plastique ne sèche que le lendemain après en tout 9 heures de séchage. Le temps de séchage a bien été réduit de moitié grâce au séchoir serre utilisé.

3.2.3 Rendement de séchage

Les courbes de rendement de séchage évaluées à partir de l'équation 8 sont présentées sur la **figure 12**. Elles représentent le rendement des différents

dispositifs de séchage en fonction du temps pour le séchage d'une part du maïs et d'autre part du riz.

On note un rendement maximum de 27,0% pour le séchage du maïs et de 42,5% pour le riz. Ces rendements sont élevés en début de séchage et sont fortement réduits en fin de séchage. Cela s'explique par le fait que lors de cette phase de séchage, l'élimination de l'eau du produit est limitée non plus par les conditions extérieures (température, humidité, etc.) mais par le produit lui-même^[16].

Au cours de la phase de ralentissement, le rendement de séchage du séchoir type serre est semblable à celui des méthodes traditionnelles testées et varie de 10% à 3%. Le produit dans le séchoir est alors presque sec.

4 Conclusion

Une maquette fonctionnelle de séchoir type serre a été conçue et réalisée localement par l'Equipe de Recherche sur la Mécanisation Agricole et le Génie des Procédés de l'Université de Lomé.

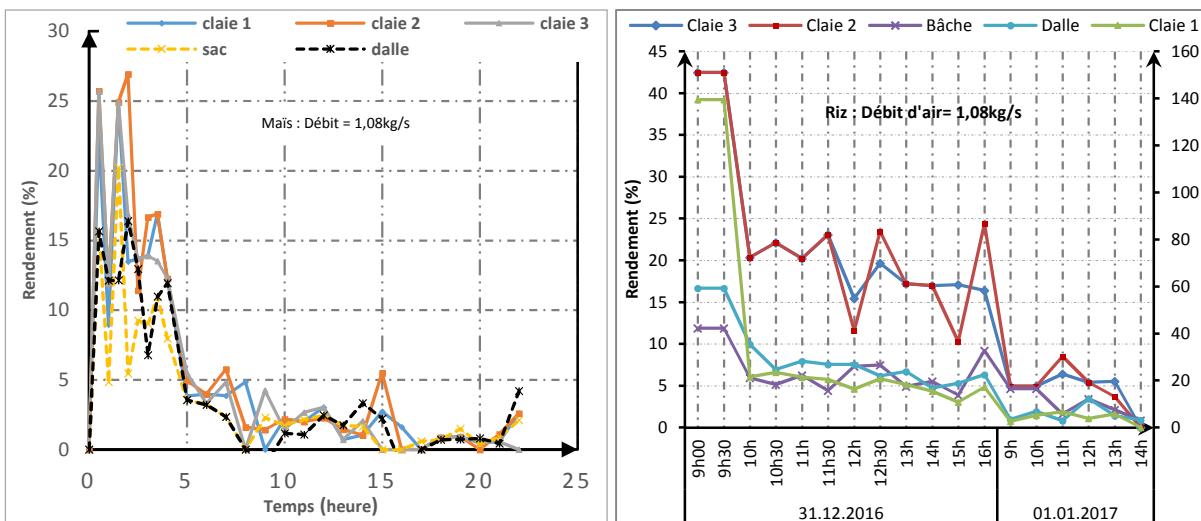


Figure 12 : variation du rendement énergétique instantané lors du séchage du maïs et du riz.

Le séchage du maïs et du riz dans un séchoir type serre et par les méthodes traditionnelles sur dalle et sur sac plastique a été réalisé. Les expérimentations ont été faites avec un débit d'air de séchage de 1,08kg/s dans le séchoir et sous l'air ambiant avec les méthodes traditionnelles.

Cette étude a permis de montrer l'intérêt de l'utilisation d'un séchoir serre par rapport à l'utilisation des méthodes traditionnelles. Elle est une contribution à l'amélioration de la conception des séchoirs solaires au Togo et en zone tropicale humide.

Les résultats présentés montrent qu'avec le séchoir serre, l'on obtient un gain de temps de l'ordre de 45% en zone humide par rapport au séchage traditionnel. La température à l'intérieur du séchoir n'excédant pas 60°C, constitue une condition favorable de préservation de la qualité des céréales séchées. Le séchage en convection forcée permet d'avoir des rendements de séchage plus importants qu'à l'air libre.

A la lumière de ces données, il apparaît que le séchoir serre peut permettre de réduire efficacement les pertes post-récoltes de céréales en Afrique de l'Ouest.

Ce travail se poursuivra pour faire des essais à la fin de chaque récolte et dans les milieux de production pour affiner les résultats avec les données réelles. Il est également question de procéder à une modélisation du séchoir type serre réalisé pour effectuer des simulations sur d'autres sites et par rapport à d'autres besoins en milieu tropical humide.

5 Remerciement

Les auteurs remercient le Programme de Productivité Agricole pour l'Afrique de l'Ouest, Projet Togo (PPAAO /WAAPP-Togo) pour le soutien financier qui a permis de mener à bien ces travaux de recherches.

6. Références bibliographique

- [1] A. S. Mujumdar, Guide to industrial drying: Principles, equipment and new developments, Colour Publications Pvt. Ltd., Mumbai, India, 2004.
- [2] FAO, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (2011) : Pertes et gaspillages alimentaires dans le monde. www.fao.org/docrep/016/i2697f/i2697f.pdf.
- [3] Boroze Tchamye Tcha-Essou, 2011. Outil d'aide à la conception de séchoirs pour les produits agricoles tropicaux, Thèse de doctorat en Science des Matériaux de l'Université de Lomé.
- [4] Boroze Tchamye Tcha-Essou, Meot Jean-Michel, Azouma Yaovi Ouézou, Desmorieux Hélène, and Napo Kossi. Decision Making in Designing and Choice of Dryer for Tropical Agricultural Crop. Indian Journal of Science and Technology, Volume 6, Issue 11, Novembre 2013, Pages 5495-5506. ISSN 0974 -5645.
- [5] Boroze T T-E, Desmorieux H, Meot J-M, Marouze C, Azouma Y O, Napo K, Inventory and comparative characteristics of dryers used in the sub-saharan zone: criteria influencing dryer choice, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Volume 40, December 2014, Pages 1240-1259.
- [6] J.J Bimbenet. "Génie des procédés alimentaires" RIA édition, Dunod" Paris. 2002.
- [7] O. V. Ekechukwu, B. Norton, Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology, Energy Conversion and Management, Volume 40, Issue 6, April 1999, Pages 615-655.
- [8] A. Fudholi, K. Sopian, M. H. Ruslan, M. A. Alghoul, M. Y. Sulaiman, Review of solar dryers for agricultural and marine products, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 1, January 2010, Pages 1-30.
- [9] S. VijayaVenkataRaman, S. Iniyar, Ranko Goic, A review of solar drying technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 5, June 2012, Pages 2652-2670.

- [10] A.A. El-Sebaii, S.M. Shalaby, Solar drying of agricultural products: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 1, January 2012, Pages 37-43.
- [11] Catalogue ouest africain des espèces et variétés végétales, FAO, 2008.
- [12] Catalogue national des espèces et variétés végétales cultivées au Togo, projet TCP/TOG/3301 (D), Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche, 2018.
- [13] CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version 2005, David R. Lide, ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
- [14] M. Augustus Leon, S. Kumar, S. C. Bhattacharya, A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 6, Issue 4, August 2002, Pages 367-393.
- [15] K. A. Amou, S. Ouro-Djobo, K. Napo, "Solar irradiation in Togo", *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* Volume 82, Numéro 2, 2010, Page 14.
- [16] P. Gbaha, H. Yobouet Andoh, J. Kouassi Saraka, B. Kaménan Koua, S. Touré, "Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow", *Renewable Energy* volume 32, Issue 11, Septembre2007, Pages 1817-1829.
- [17] A. Eke, E. Arinze "Natural convection mud type solar dryers for rural farmers" *Nigerian Journal of Technological Development*, Volume 8, No 2, 2011, Pages 92 – 106.
- [18] A. Charreau, R. Cavaille "Séchage théorie et pratique" *Technique de l'Ingénieur, génie des procédés*, 2480-1; 2480-23. Février 1995