

PERFORMANCE THERMIQUE DE DEUX PROTOTYPES DE SÉCHOIRS (CAISSE ET HYBRIDE) POUR LE SÉCHAGE DE LA TOMATE (*LYCOPERSICUM ESCULENTUM*) ET QUALITE DES LAMELLES SÉCHÉES

NOUKPOZOUNKOU Mahouton Siméon Parfait¹, ABOUDOU Kowiou¹, GOUGBE Alice¹, GOUDJINOU^{1,3} Codjo, AÏSSO C. B. Richmy², AHOUANNOU Clément³, SOUMANOU Mansourou Mohamed^{1*}

1. Université d'Abomey-Calavi, École Polytechnique d'Abomey-Calavi, Département de Génie de Technologie Alimentaire, Unité de Recherche en Génie Enzymatique et Alimentaire, 01 BP 2009 Cotonou 01, Bénin
2. Institut National de Recherche Agricole du Bénin, Programme Cultures Maraîchères, 01 BP 884 Cotonou, Bénin
3. Université d'Abomey-Calavi, École Polytechnique d'Abomey-Calavi, Département de Génie Mécanique et Énergétique, 01 BP 2009 Cotonou 01, Bénin

Reçu le 09/11/2022, Révisé le 18/05/2023, Accepté le 05/06/2023

Résumé

Description du sujet : La tomate est un ingrédient utilisé dans la quasi-totalité de nos repas au Bénin à cause de ses intérêts nutritionnels. Cependant, elle est un produit hautement périssable occasionnant jusqu'à 40% de pertes post-récoltes. Afin de réduire ces pertes, deux types de séchoirs ont été réalisés puis leurs performances thermiques et la qualité des tomates séchées ont été évaluées.

Objectif : La présente étude vise à évaluer les performances de deux séchoirs pour garantir la qualité du séchage des fruits de tomate produits au Sud Bénin

Méthodes : Deux types de séchoirs réalisés au Centre Africain de Recherche sur la Conversion d'Énergie ont été expérimentés en milieu réel pour le séchage de la tomate. Pour ce faire, les performances thermiques des dispositifs ont été étudiées et l'influence des diverses conditions de séchage (température, humidité de l'air) sur la qualité du produit séché a été évaluée en utilisant les méthodes standards.

Résultats : Les résultats ont montré que le séchoir hybride présente une meilleure performance thermique que le séchoir caisse avec 5h et 20 h respectives comme durées de séchage comparativement aux 30h pour le séchage artisanal. Les plus faibles valeurs de teneur en eau finale (9,08 %) des tomates séchées sont obtenues avec le séchoir hybride. Ce dernier a préservé au mieux la couleur des tomates séchées qui ont été les plus appréciées par les panélistes en termes de couleur (4,2/5) et de goût (4,4/5). Une différence significative au seuil de 5% ($p < 0,05$) est observée pour le degré Brix (valeur) et le pH (valeur) des tomates séchées quel que soit le séchoir utilisé.

Conclusion : Le séchoir hybride a donné des tomates séchées de très bonnes qualités physicochimique et organoleptique avec de temps de séchage relativement réduit. La vulgarisation de ce prototype de séchoir reste un atout pour la valorisation des produits agricoles en milieu paysan.

Mots clés : Séchage; Séchoirs caisse et hybride; Performance thermique; Tomate séchées.

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF TWO PROTOTYPE DRYERS (CAISSE AND HYBRID) FOR DRYING TOMATO (*LYCOPERSICUM ESCULENTUM*) AND THE QUALITY OF THE DRIED STRIPS

Abstract

Description of the subject: The tomato is an ingredient used in almost all of our meals in Benin because of its nutritional interests. However, it is a highly perishable product causing up to 40% post-harvest loss. In order to reduce these observed losses, two types of dryers were produced and then their thermal performances were evaluated.

Objective : This study aims to evaluate the performance of two dryers to guarantee the quality of drying of tomato fruits produced in southern Benin.

Methods : Two types of dryers made at the African Center for Research on Energy Conversion were tested in a real environment for drying tomatoes. To do this, the thermal performances of the devices are studied and the influence of the various conditions of the drying air (temperature, air humidity) on the drying process then the analysis of the quality of the product dried by methods standards.

Results : The results showed that the hybrid dryer has better thermal performance than the box dryer with 5h and 20h respectively of drying time compared to 30h for artisanal drying. The lowest final water content values (9.08%) of the dried tomatoes are obtained with the hybrid dryer. The latter best preserved the color of the dried tomatoes which were the most appreciated by the panelists in terms of color (4.2/5) and in terms of taste (4.4/5). A significant difference at the 5% threshold ($p < 0.05$) is observed between the Brix degree (value) and the pH (value) regardless of the dryer used.

Conclusion : The hybrid dryer gave dried tomatoes of very good physicochemical and organoleptic quality with relatively short drying time. The popularization of this prototype dryer remains an asset for the development of agricultural products in rural areas.

Keywords : Drying, Box and hybrid dryers, Thermal performance, Dried tomatoes.

* Auteur correspondant: SOUMANOU M. Mohamed, E-mail: msoumanoufr@yahoo.fr

INTRODUCTION

La conservation des produits agricoles est un impératif essentiel dans les pays en voie de développement où la production est concentrée sur des périodes de récolte de courte durée. Pour cela, la mise au point des techniques de conservation et de transformation post-récolte des produits agricoles dans ces pays tient une place importante dans la réduction des pertes constatées entre la récolte et la mise à disposition des produits aux consommateurs. En Afrique, ces pertes sont estimées en moyenne à 25 % pour les céréales et à plus de 50 % pour les fruits, les légumes et les tubercules [1]. Par conséquent, l'accès des petits exploitants agricoles à des techniques de conservation post récoltes efficaces et abordables devient donc une priorité de développement [2]. Parmi les différentes techniques de conservation des produits agricoles, le séchage reste le procédé le pratiqué par les producteurs [3, 4]. C'est un procédé qui consiste à éliminer l'excès d'eau d'un produit alimentaire afin de réduire les pertes post-récolte, les altérations biologiques et chimiques du produit pendant le stockage [4, 5]. Les méthodes traditionnelles de séchage couramment utilisées par les producteurs, présentent l'inconvénient d'une longue durée de séchage et expose malheureusement les produits à sécher aux intempéries (poussière, pluie, insectes, vent) entraînant ainsi dans beaucoup de cas, la dégradation biologique du produit [4, 6, 7].

Ainsi, plusieurs séchoirs [8, 10, 23] ont été mis au point ces dernières années à travers les projets et programmes afin d'améliorer la qualité de ces produits séchés et de les conserver sur une longue période. Cependant, malgré les différents efforts fournis pour l'amélioration de la qualité des produits séchés, les séchoirs développés à cet effet sont inaccessibles aux petits agriculteurs qui constituent pourtant les premières victimes des pertes post-récoltes [6]. La plupart des séchoirs mis au point, utilisent une source d'énergie coûteuse comme l'électricité et/ou une combinaison d'énergie solaire et d'une autre forme d'énergie [8]. Par ailleurs, les séchoirs à combustibles sont souvent caractérisés par la contamination des produits séchés par la fumée [6]. De même, les séchoirs locaux disponibles manquent de capacité de maîtrise des paramètres aérothermiques (température, humidité relative et débit d'air de séchage) dans la chambre de

séchage avec pour conséquence des changements indésirables tels que la réduction drastique des constituants nutritionnels, un goût et une couleur désagréables du produit [6, 9].

En effet, les problèmes de séchage sont nombreux et ne semblent pas être résolus malgré les transferts de technologies performantes de l'Occident. Divers échecs imposent qu'il faut proposer aux pays en développement des technologies plus adaptées qui prennent en compte les besoins réels des populations concernées [10]. Ainsi, la mise au point de séchoirs accessibles et adaptés aux conditions climatiques locales reste sans doute une solution aux pertes postes récoltes constamment enregistrées pour les produits agricoles à forte teneur en eau comme la tomate. C'est dans cette optique qu'il a été construit au Centre Africain de Recherche sur la Conversion d'Énergie (CARCE-DON ELOHIM) deux types de séchoirs (caisse et hybride) pour le séchage des fruits de tomate produite au Sud du Bénin. La présente étude vise à évaluer les performances thermiques de ces deux prototypes de séchoirs et la qualité des lamelles de tomates séchées.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Présentation du site d'expérimentation

Les essais ont été réalisés au sein de l'entreprise Natural Agrofood, spécialisée dans le séchage des produits agricoles notamment la tomate, à Avrankou au Sud du Bénin du mois d'Octobre en Décembre 2021. La commune d'Avrankou est une ville située dans le département de l'Ouémé au sud du Bénin avec l'humidité relative de l'air avoisinant en moyenne 90%. La température varie entre 28,9°C et 35°C et elle atteint rarement 50°C en saison sèche, avec 6,55° de latitude et 2,66667° de longitude.

2. Matériel

2.1 Présentations des séchoirs réalisés

Les séchoirs présentés dans ce travail sont réalisés en se basant sur des travaux antérieurs et des conditions climatiques de l'environnement de séchage. Il s'agit d'un séchoir caisse et d'un séchoir hybride développés au Centre Africain de Recherche sur la Conversion d'Énergie (CARCE-DON ELOHIM)

- **Séchoir caisse** : Le séchoir caisse présenté par la figure 1 est un séchoir solaire direct à convection forcée de l'air.

Il est composé de deux modules ($1,5 \times 1 \times 0,3 \text{ m}^3$), peints en noir pour faciliter l'absorption de la quasi-totalité du rayonnement solaire par le produit [11] et sur lesquels sont fixés de grillage aluminium et deux mélangeurs de chaleur. Le séchoir est recouvert d'une couverture transparente (polyéthylène) de 2 mm.

Sur la longueur et largeur du séchoir, se trouvent respectivement trois et deux trous circulaires de ventilation de 6 mm de diamètre chacun pour faciliter le renouvellement de l'air dans le séchoir. Ce dernier a une capacité de séchage de 4 à 6 Kg de tomate par cycle de séchage



Figure 1. Photos du séchoir caisse : séchoir caisse fermé (a) ; séchoir caisse ouvert (b)



Figure 2. Photos des vues externe (a) et interne (b) du séchoir hybride :

- **Le Séchoir hybride** : Le séchoir présenté par la figure 2, est un séchoir hybride (solaire indirect et à combustible) à convection forcée avec recyclage contrôlé d'air. Ses dimensions extérieures sont : $H = 2,10 \text{ m}$; $L = 0,75 \text{ m}$ et $l = 0,50 \text{ m}$. Sa partie intérieure revêtue de tôle en aluminium, appelée chambre de séchage, a une capacité de $0,375 \text{ m}^3$ soit une capacité de séchage de 10 kg . L'extérieur du séchoir est aussi recouvert d'une tôle d'aluminium enduite d'une couche de peinture argentée. Il est doté d'une résistance solaire, d'une résistance à combustible, d'une cheminée de désenfumage pour évacuer les fumées de combustion et de deux canaux d'alimentation de la chambre de combustion. Ce séchoir permet d'avoir un

écoulement d'air ascendant et donc un séchage traversant. La température de l'air asséchant peut varier entre 27 et 120°C et sa régulation est assurée par un thermostat du type AKO-14123 et un aspirateur de chaleur qui se met en marche automatiquement pour expulser la chaleur excédante à l'extérieur lorsque la température dépasse la plage définie. La plage d'utilisation de ce thermostat est de -55 à 150°C avec une précision de $\pm 1^\circ\text{C}$. Pour homogénéiser la distribution de la chaleur dans la chambre de séchage et évacuer l'air humide vers l'extérieur, le séchoir est équipé de trois mélangeurs de chaleurs, deux panneaux de 200 W chacun et une batterie de 200 Ah .

- La chambre de séchage contient quatre plateaux en acier inoxydable et deux amplificateurs de chaleur. Les différents paramètres thermophysiques pris en compte pendant l'opération de séchage sont la température, l'humidité de l'air et la masse du produit.

2.2 Matériel végétal

Le matériel végétal est constitué de fruits de tomates fraîches et saines de la variété locale « Akikon » achetée dans le marché local d'Avrankou et reconnue comme la variété la plus cultivée et la plus disponible sur le marché [4]. Ces échantillons ont été transportés au centre de séchage Naturel Agrofood pour les essais.

3. Méthodes

3.1 Séchage des fruits de tomate

Douze kilogramme (12 kg) de fruits de tomates fraîches et saines de la variété Akikon, ont été utilisés pour le séchage. Après réception, elles ont été triées manuellement avant d'être lavées à l'eau potable. Par la suite, elles ont été pesées, coupées en tranches de 5 mm et divisées en trois parties égales. Une partie a été séchée avec le séchoir caisse, la deuxième partie avec le séchoir hybride à 62.5°C et la dernière partie sur le plateau en argile à la température ambiante. Pour le séchoir caisse et le séchage sur plateau en argile à l'air libre, les essais ont commencé à 9 heures du matin et se sont arrêtés à 19 heures. En ce qui concerne le séchoir hybride, trois modes de séchage ont été expérimentés. Il s'agit du mode 1 (100% solaire, du mode 2 (100% combustible) et le mode 3 (solaire et combustible). L'évolution de la température externe et interne dans les deux séchoirs et la teneur en eau ont été déterminées chaque 1 heure jusqu'à la fin du séchage.

3.2 Détermination des paramètres cinétiques de séchage

-Détermination de la température de séchage, les températures interne et externe du séchoir caisse ont été prises dès le début du séchage jusqu'à la fin à intervalle d'une heure à l'aide de deux thermomètres de marque (ITA-Digital thermometer) placés à l'intérieur et à l'extérieur dudit séchoir. Quant au séchoir hybride, la lecture de température à l'intérieur a été faite grâce au thermostat (AKO-14123) adapté à ce séchoir durant la même périodicité d'une heure.

-Évolution de la perte de poids des tranches de tomates au cours du séchage, la variation de la masse humide du produit $M_h(t)$ en fonction du temps est déterminée en faisant des pesées statiques au moyen d'une balance de précision $\pm 0.001g$ liée à un indicateur de modèle CD11. Le pas de temps varie de 10 min au début des essais jusqu'à 30 min vers la fin de l'expérience. Les différentes prises de masse effectuées pour différents jours de séchage permettent à la fin du processus d'établir la cinétique de séchage une fois la masse de matière sèche connue. La masse sèche de l'échantillon est ensuite calculée et celle de la quantité de produit sec sur chacune des claies est déduite par extrapolation. Les courbes de séchage sont obtenues à partir des mesures de la variation de masse du produit au cours du temps.

3.3 Détermination des paramètres physicochimiques des fruits de tomate séchés

La teneur en matières sèches des échantillons a été déterminée suivant la méthode AOAC 44-15A [12]. La couleur des échantillons a été déterminée à l'aide d'un colorimètre portable Minolta CR10, par des mesures de L^* (luminosité : (0 : noir et blanc : 100), a^* ($a > 0$ rouge, $a < 0$ vert) et b^* ($b > 0$ jaune, $b < 0$ bleu) selon le système CIELAB le séchage chaque une heure. Le pH des différents échantillons a été déterminé suivant la méthode modifiée par AOAC [12]. Il a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre (pH-009 (I)) préalablement étalonné avec des solutions tampons de pH = 7 et pH = 4 à la température ambiante. La mesure a été effectuée avec une solution composée de 1g de l'échantillon dans 20ml d'eau distillée. Les teneurs en sucres totaux des échantillons de tomates ont été déterminés à l'aide d'un réfractomètre portable, selon la méthode rapportée par certains auteurs [14]. À 1g de l'échantillon a été ajouté 20 ml d'eau distillée avant d'être homogénéisé. La lecture a été effectuée à l'aide d'un réfractomètre (ATC).

3.4 Analyse statistique

Les résultats d'analyse ont été traités à l'aide du tableur Microsoft Excel 2016, notamment pour déterminer les moyennes et les écarts types. Le logiciel SPSS v 16.0 a été utilisé pour la comparaison des moyennes en utilisant le test de signification ANOVA (Newman-Keuls) au niveau de 5%.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. *Évolution des températures en fonction du temps pour chaque mode de séchage*

La figure 3 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour diverses méthodes de séchage des tranches de tomates. Il ressort de l'analyse de cette figure que les durées de séchage de la tomate locale sont respectivement de 30 h, 20h et 10h pour le séchage ambiant (témoin), le séchoir caisse et le séchoir Hybride. Les courbes obtenues présentent des allures quasi similaires avec une variation de température de 30°C à 48,6°C pendant 3 jours (soit 30 h) à l'extérieur du séchoir caisse tandis que la température interne a atteint les pics de 66,1 °C et 57,6 °C respectivement le premier et le dernier jour de séchage. Entre 10h30 et 15h30, on note une augmentation régulière de la température de séchage ($T \geq 50,5$) durant les deux jours de séchage. Cette observation serait due à l'augmentation de l'énergie thermique solaire. En effet, certains auteurs [15] ont signalé que les températures de séchage et l'énergie thermique sont plus élevées dans les séchoirs solaires pendant les heures de l'après-midi entre 11h00 et 15h00 qu'en fin de soirée. La durée de séchage obtenue avec le séchoir caisse pourrait s'expliquer par l'augmentation de la température de séchage (jusqu'à 55°C), une température largement supérieure à celle du séchage ambiant durant toute la durée de l'opération. L'augmentation du rayonnement solaire pourrait également contribuer à l'augmentation de l'énergie solaire thermique interne dans le séchoir ce qui intensifie les échanges convectifs et accélère la migration de l'eau à l'extérieur du produit.

Avec le séchoir hybride, l'allure des courbes expérimentales indique une augmentation de la température de 30°C à 62,5 °C après 4h du démarrage du séchoir pour le mode (100% solaire), 2 h pour le mode (100% Combustible) et 1h pour le mode (Combustible et solaire).

Cette température est restée stable durant le séchage pour le mode (combustible et solaire). La combustion vient donc en appoint à l'énergie solaire pour une constante dans le séchage.

Nous remarquons également que la durée de séchage du séchoir hybride avec le mode de séchage (100 % solaire) est plus longue (10h) que celle des modes de séchage (combustible + solaire) (5h) et le mode (100 % combustible). Ce constat serait dû à la fluctuation du rayonnement solaire qui est fonction du moment de la journée donc de l'intensité du soleil. Les températures de l'air de séchage atteintes par d'autres séchoirs solaires hybrides conventionnels rapportés dans la littérature n'étaient capables d'augmenter les températures de l'air de séchage qu'entre 6,4 et 9°C au-dessus des températures ambiantes [16, 17,18] et cette plage dépendait de la couverture nuageuse et d'autres conditions météorologiques connexes. D'autres auteurs ont développé de séchoir dont les températures de l'air de séchage variaient entre 44 et 55°C, au-dessus des températures ambiantes [19]. Le fonctionnement du système de séchage avec le séchoir hybride en évaluation est donc performant car la température de l'air asséchant peut aller au-delà de 62,5°C. Cependant, le séchoir hybride développé récemment par ABUBAKAR *et al.* [20] a permis d'atteindre une température maximale de l'air asséchant avoisinant 66°C. Cette température est restée stable pendant 7h grâce au système de stockage thermique adapté au séchoir. La courte durée de séchage observée au niveau des deux derniers modes (100% combustible » et « combustible + solaire ») est nécessaire pour obtenir un produit séché de bonne qualité nutritionnelle et organoleptique. En effet, l'auteur [4] a révélé que les produits séchés qui séjournent durant une courte période dans les séchoirs conservent mieux leurs caractéristiques nutritionnelles et organoleptiques. Cette courte durée de séchage serait due à la quantité de chaleur produite par la chambre de combustion qui vient en appoint à la résistance solaire d'une part et la meilleure distribution et conservation de cette chaleur dans la chambre de séchage par les mélangeurs de chaleur d'autre part. Ces résultats sont meilleurs à ceux des études conduites par HASTÜRK-ŞAHİN *et al.* [21] qui ont révélé qu'il faut habituellement 4 voire 7 jours pour sécher la tomate.

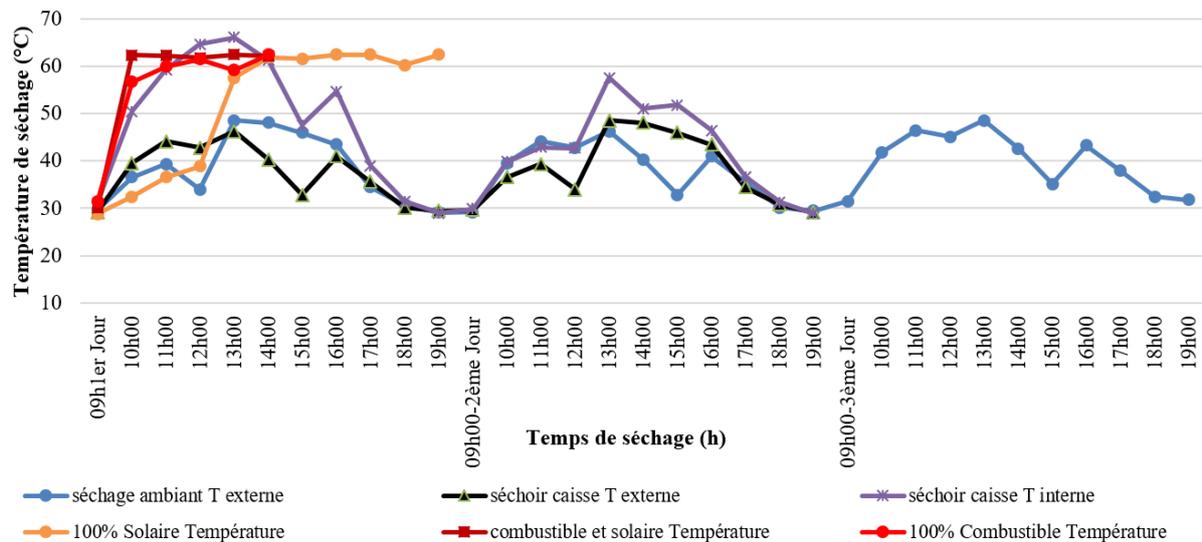


Figure 3. Évolution de la température de séchage de tomate en fonction des modes de séchages.

2. Évolution de la teneur en eau de la tomate en fonction du mode de séchage

L'évolution de la teneur en eau des tranches de tomate en fonction des modes de séchage a été présentée par la figure 4. Sur cette figure, on note que l'augmentation de la température de 30 à 48,6°C s'accompagne de la diminution de la teneur en eau des tranches de tomate. En effet, selon LAMLOUMI *et al.* [22], une température élevée occasionne une augmentation de la pression osmotique de l'eau à l'intérieur des produits ce qui accélère la migration de l'eau des tranches de tomate vers l'extérieur au bout de 30h avec le séchage ambiant sur plateau en argile. Les heures de forte diminution de la teneur en eau observée varient en moyenne entre 12h45 et 17h15. Par ailleurs, LAMLOUMI *et al.* [22] et UMESH & KARALE [29], ont révélé que les matériaux en argile ont l'aptitude de jouer le rôle d'amplificateur et de conservateur de chaleur, ce qui permet de gagner de temps. Pour le séchoir caisse l'allure des courbes expérimentales nous montre que l'augmentation simultanée de la température externe et interne a entraîné une diminution de la teneur en eau de 94,71 à 10,08% au bout de 20 h de séchage (soit deux jours) tandis que l'augmentation de la température de 30 à 62,5°C pour le séchoir hybride a occasionné une diminution de la teneur en eau initiale de 94,71 % à une teneur en eau finale de 10,16 % ; 10,09 % et 10,02 % respectivement pour le mode de séchage (100 % solaire), (combustible + solaire) et le mode (100 % combustible) au bout de 5 heures.

L'analyse des courbes de cette même figure 4 révèle que la perte de l'eau par le produit devient presque nulle en 30 h (3jours) avec le séchage à l'air libre (témoin), en 20 h avec le séchoir caisse contre 10 h, 5h et 5 h avec le séchoir hybride respectivement pour les modes de séchage (100 % solaire), (combustible + solaire) et le mode (100 % combustible). Ces résultats ont également montré que la teneur en eau des tranches de tomates diminue constamment avec le temps de séchage jusqu'à l'obtention des valeurs les plus faibles pour ce paramètre. Par ailleurs, trois phases de séchage ont été observées sur les courbes de séchage. La première phase (période de mise à température) au cours de laquelle l'évaporation de l'eau libre à la surface du produit est lente et se termine après 2 h pour les modes de séchage (100 % solaire) et le séchoir caisse. Cependant, la fin de cette première phase est observée après 3h pour le séchage en plein air du produit. La deuxième phase est celle pendant laquelle l'évaporation de l'eau est rapide. Elle varie entre 2h et 10h pour le séchoir caisse, entre 2h et 7h pour le mode (100 % solaire), entre 3h et 17h pour le séchage à l'air libre tandis que celle des modes (100% combustible) et (solaire + combustible) est comprise entre 1h et 3h. Enfin, la dernière phase pendant laquelle une partie de l'eau liée à la structure même du produit s'évapore. Cette dernière phase n'a duré que 2 h pour la plupart des modes de séchage. Ces tendances sont similaires aux résultats de nombreuses expériences de séchage des fruits rapportées par des travaux antérieurs utilisant des séchoirs hybrides conventionnels améliorés [15, 23].

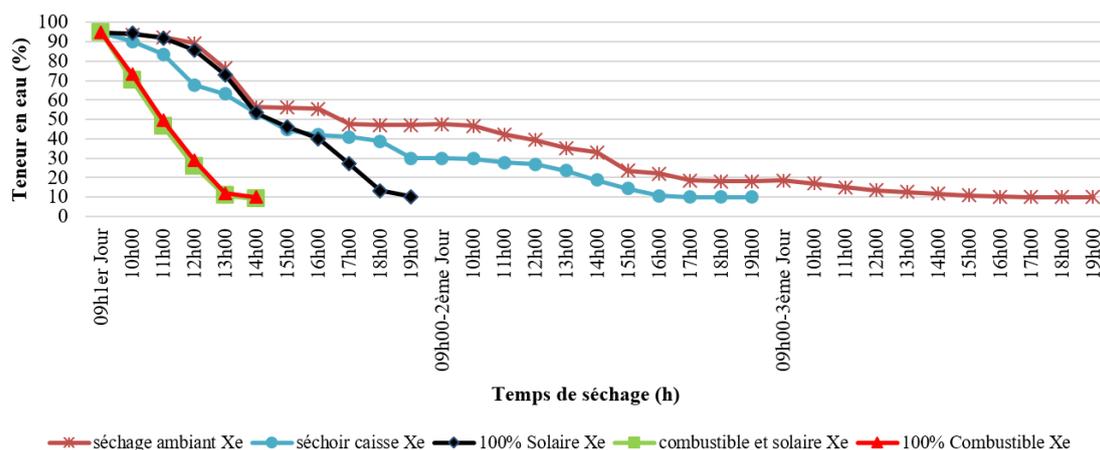


Figure 4. Evolution de la teneur en eau en fonction des modes de séchages.

3. Intérêts et limites de chaque séchoir

Le tableau 1 présente les performances techniques et économiques de chaque séchoir. L'analyse de ce tableau a révélé que la durée de séchage des tranches de tomates varie en fonction de chaque séchoir. La durée de séchage des tranches de tomate est de $30 \pm 0,5$; de $20 \pm 0,5$ h et de $5 \pm 0,25$ h respectivement pour le séchage en plein air, le séchage avec les séchoirs caisse et hybride. Le séchoir caisse a permis de réduire la durée de séchage des tranches de tomates de 10 h comparativement au séchage en plein air. Cette réduction est plus importante avec le séchoir hybride et est de 20h, 25h et 30h respectivement pour les modes (100 % solaire), (100 % combustible) et (solaire + combustible). Ces résultats sont en accord avec ceux de HOUSSOU *et al.* [31] et MISS & BUTALE [32], qui ont rapporté que l'augmentation de plus de 5°C de la température à l'intérieur du séchoir hybride serait due à la composition du séchoir constitué de gaz combustible qui vient en appoint en énergie, de la chambre de séchage peinte en noir et du plexiglas qui couvrent les chambres de séchage en créant un effet de serre et fait augmenter la température. Par ailleurs, la courte durée de séchage (5h) observée pour le séchoir hybride serait due à la quantité de chaleur produite par la chambre de combustion qui vient en appoint à la résistance solaire d'une part et la meilleure distribution et conservation de cette chaleur dans la chambre de séchage par les mélangeurs de chaleur d'autre part. Selon les études effectuées par KANMOGNE [6], le séchoir à combustible permet de réduire la durée de séchage et de protéger le produit contre la pluie et les insectes. De plus, la température de séchage est plus uniforme grâce au thermostat, aux amplificateurs de chaleur et aux mélangeurs

de chaleur dont le séchoir hybride est équipé. Par ailleurs, la présence d'aspirateur de chaleur qui expulse le surplus de chaleur en cas d'excès permet une distribution uniforme de la chaleur dans la chambre de séchage et permet ainsi de préserver les nutriments sensibles à la chaleur. En outre, la cheminée de fumée n'étant pas en contact avec la chambre de séchage, cela évite le risque de contamination des produits séchés par la fumée et empêche le goût de fumée sur le produit séché car la fumée a la propriété de fixer la matière grasse (huile) [6]. L'analyse des durées de séchage a montré que la durée de séchage (5h) des tranches de tomate en utilisant le séchoir hybride avec le mode « 100% de combustible » ne se différencie pas de celle (5h) du séchoir en utilisant le mode « combustible + solaire ». Toutefois, une différence significative a été observée entre les teneurs en eau finale des échantillons de tomates séchées avec les deux modes de séchage ($10,02 \pm 0,03$ et $9,08 \pm 0,66$) en utilisant le séchoir hybride. Cela s'expliquerait par le fait que l'énergie du combustible vient en appoint à l'énergie solaire et réduit davantage la teneur en eau dans les lamelles de tomate séchée. Ce mode permet aussi la réduction de 0.6 kg la quantité de combustible à utiliser au cours des 5 h de séchage. En dépit de ces performances, le séchoir hybride nécessite la présence d'un spécialiste pour la maintenance tandis que les deux autres modes de séchage ne l'exigent pas (tableau 1). Sur le plan financier, le coût de réalisation est de 50.000 et 10.000 FCFA respectivement pour le séchoir caisse et le séchage ambiant sur plateau en argile contre 850.000 FCFA pour le séchoir hybride. Néanmoins, le séchoir hybride évite les risques de contamination et de remontée d'humidité des produits séchés et peut être utilisé en toute saison (en présence ou en absence du soleil).

Tableau 1. Quelques caractéristiques des séchoirs réalisés

| Paramètres évalués | Séchage ambiant (témoin) | Séchoir caisse | Séchoir hybride | | |
|--|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------|
| | | | 100% Combustible | Combustible + solaire | 100% Solaire |
| Durée de séchage | 30±0,5h | 20±0,5h | 5±0,25h | 5±0,5h | 10±0,2h |
| Gain de temps | 0 | 10h | 25h | 25h | 20h |
| Température | 48,6±0,4°C | 66,1±1°C | 62,5±4°C | 62,5±6°C | 62,5±0°C |
| Capacité cyclique de production | 10 kg | 6 Kg | 10 Kg | 10 Kg | 10Kg |
| Coût de réalisation | 10.000 fr | 50.000 fr | 810.500 fr | 810.500 fr | 810.500 fr |
| Énergie consommée | 0 | Énergie thermique solaire | 2 kg de combustible /cycle | 1.4kg de combustible + énergie thermique solaire | Énergie thermique solaire |
| Maintenance | Ne nécessite pas un technicien | Peut nécessiter un technicien | Nécessite un spécialiste | | |
| Nettoyage | Très facile | facile | Nécessite le retrait des plateaux | | |
| Risque de contamination | Très élevé | faible | Inexistant | | |

4. Qualité physicochimique des tranches de tomates séchées

Le tableau 2 présente l'effet des méthodes de séchage sur les caractéristiques physico-chimiques des tomates séchées. Ce tableau révèle que les caractéristiques physicochimiques des tomates séchées varient en fonction du type de séchoir utilisé. D'une teneur en eau initiale de 94,71%, on obtient à la fin du séchage une teneur en eau finale de 10,15% ; 10,08% ; 10,02% ; 9,08 % et 10,16% respectivement pour le séchage à température ambiante, pour le séchoir caisse, le séchoir hybride (mode 100% combustible), (combustible + solaire) et celui du mode (100% solaire). La teneur en eau la plus faible (9,08 %) est obtenue en très peu de temps (5h) avec le séchoir hybride (mode combustible + solaire) tandis qu'une teneur en eau de 10,15 % en 30 h et 10,08 % en 20h sont respectivement obtenues avec le séchoir caisse et le séchage à l'air libre. Cependant, le séchage à l'air libre expose les produits à la pollution par la poussière de l'air, qui véhicule des microparticules de sable et les microbes [24, 33].

La couleur est un facteur qui détermine la préférence du consommateur pour tout produit agroalimentaire. La couleur rouge de la tomate (séchée ou non) est le paramètre le plus important pour sa qualité marchande [25, 28]. Les paramètres de couleur des tomates séchées ont varié en fonction des types de séchoirs et du mode de séchage (tableau 2). La plus faible couleur ($L^*=44,35\pm 0,3$, $a^*=27\pm 0,44$, $b^*=18\pm 0,2$) a été obtenue pour le séchage à l'air ambiant tandis que la tomate séchée avec le

séchoir hybride a présenté les plus fortes valeurs de luminance ($L^*=47,15\pm 0,7$, $L^*=46,75\pm 0,1$ et $L^*=45,9\pm 0,56$), de rouge ($a^*=31,43\pm 0,67$, $a^*=30,3\pm 0,67$, $a^*=31,35\pm 0,62$) et une faible valeur du jaune ($b^*=16,14\pm 0,53$, $b^*=16,84\pm 0,3$, $b^*=15,72\pm 0,88$) quelque en soit le mode de séchage. On note donc que les tranches séchées avec le séchoir hybride préservent au mieux leur couleur initiale. Cela pourrait s'expliquer par la maîtrise des facteurs temps/température dans le séchoir hybride, qui aurait préservé la concentration en lycopène des tomates au cours du séchage. En effet, certains auteurs ont observé que le changement de couleur typique des poudres de tomates c'est-à-dire l'augmentation du jaunissement, la diminution des rougeurs et un éclaircissement concomitant de la couleur pourraient être associés à la dégradation du lycopène, un contributeur majeur à la couleur de la tomate en raison de son carotène rouge vif et de son pigment caroténoïde [25, 26]. Certains auteurs ont rapporté que le lycopène est sensible à l'exposition à la lumière et à la chaleur sur une longue durée [27]. Les paramètres tels que le pH et le Brix ont également été évalués sur les tranches de tomates séchées. Le test de Newman-Keul indique qu'il n'existe aucune différence significative entre les pH et Brix des tranches de tomates séchées avec les séchoirs et leur mode de séchage (tableau 2). En effet, les tranches séchées ont presque le même goût, ce qui constitue un avantage pour les séchoirs hybride et caisse, qui n'altèrent pas le goût des tomates séchées

Tableau 2. Caractéristiques physicochimiques des tomates séchées suivant le type de séchoir

| | Séchage température ambiante (plateau en argile) | Séchoir Caisse | Séchoir hybride | | |
|---------------------------------|--|-------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | | | 100 % combustible | Combustible + Solaire | 100 % solaire |
| Teneur en eau finale (%) | 10,15±0,53 L=44,35±0,3 | 10,08±0,46 L=44±0,8 | 10,02±0,03 L=45,9±0,56 | 9,08±0,66 L=46,75±0,1 | 10,16±0,44 L=47,15±0,7 |
| Couleur finale | a=27,7±0,44 b=18±0,2 | a=29±0,7 b=17,4±0,23 | a=31,43±0,67 b=16,14±0,53 | a=30,3±0,67 b=16,84±0,3 | a=31,35±0,62 b=15,72±0,88 |
| Brix Finale | 9,52±0,11 | 9,50±0,32 | 9,6±0,78 | 9,5±0,0 | 9,5±0,8 |
| pH final | 5,3±0,4 | 5,29±0,0 | 5,3±0,55 | 5,3±0,84 | 5,3±0,0 |

5. Qualité sensorielle de la tomate séchée

L'analyse hédonique des différents échantillons de tomates séchées a permis d'obtenir les profils sensoriels caractérisés par les attributs suivants : arôme, texture, couleur et goût (figure 5). Cette dernière montre que les échantillons de tomate séchée issues des différents séchoirs ont été diversement appréciés par le panel de dégustateurs. Il ressort des scores attribués par les panélistes aux attributs que les tranches de tomate séchées par les trois modes de séchage du séchoir hybride étaient significativement les

plus appréciés en terme de couleur et goût, suivi de celles séchées par le séchage ambiant tandis que les attributs arômes et textures ont été agréablement appréciés par 29 dégustateurs sur 30 pour tous les échantillons quel que soit le type de séchoir. En effet, la couleur est le premier paramètre qui influence le choix des consommateurs [28, 29, 30]. Ces résultats indiquent donc que le type de séchoir a une influence significative sur les attributs sensoriels couleur et goût des tranches de tomates séchées.

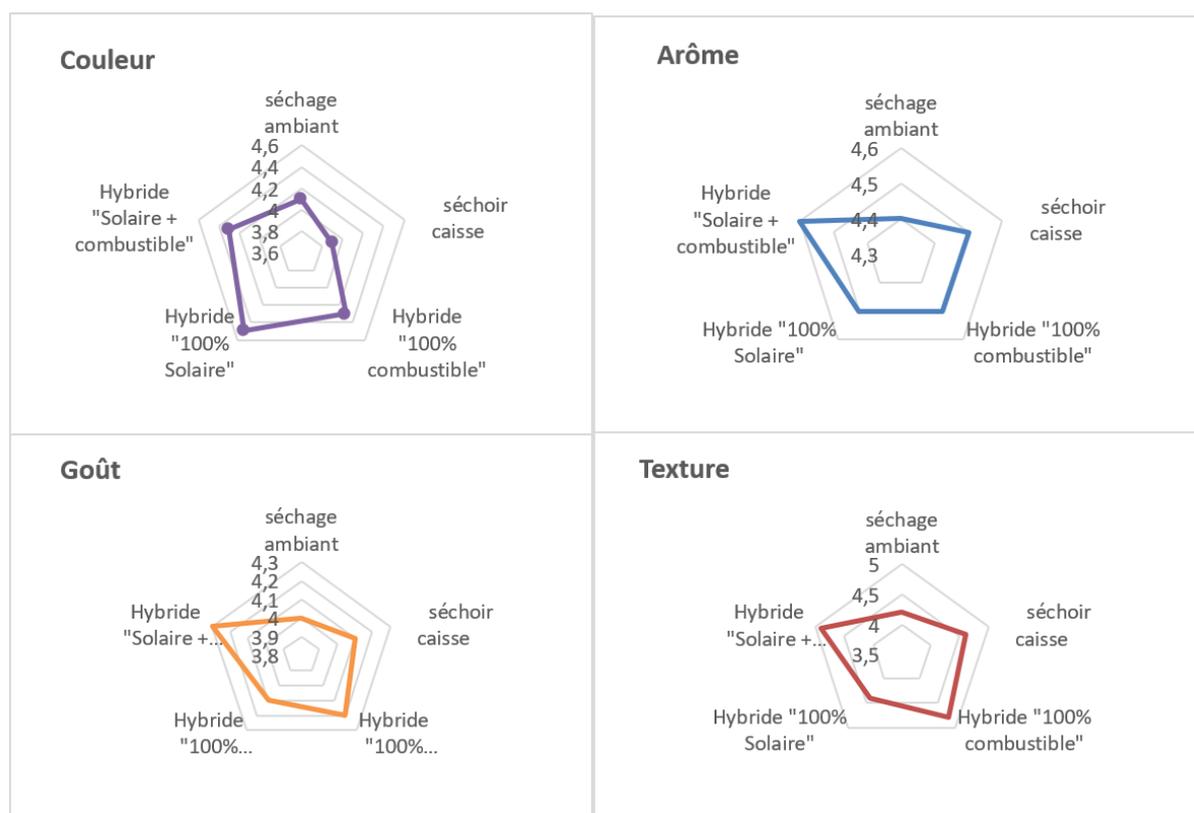


Figure 5. Qualité sensorielle des différents échantillons de tranches de tomate séchées

CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer les performances des séchoirs caisse et hybride comparées à celles du séchage en plein air des tranches de

tomate. Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que les performances du séchoir hybride étaient meilleures à celles du séchoir caisse, qui à son tour est meilleur au séchage artisanal.

Les deux séchoirs hybride et caisse ont mis respectivement 5h et 20 h pour sécher efficacement les tranches de tomate comparativement aux 30h enregistrées avec le séchage à l'air libre des produits. Les performances du séchoir hybride confirment bien sa capacité accrue dans l'amélioration de la qualité de tomate séchée notamment pour les paramètres de la couleur, de la teneur en eau, du pH et du degré Brix. Les tranches de tomate séchées obtenues avec ce prototype de séchoir ont été agréablement appréciées par les panélistes en ce qui concerne les attributs couleur, goût, et texture. Par conséquent, ce séchoir pourrait être déployé et utilisé dans des endroits éloignés sans électricité avec ou sans énergie solaire pour servir convenablement les agro-industriels aux ressources limitées du Bénin et de l'Afrique de l'Ouest. Toutefois, la conservation des tranches de tomate séchées en milieu réel serait indispensable pour confirmer les performances enregistrées de nos prototypes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique pour son appui financier accordé au premier auteur de cet article. Nous remercions également tout le personnel du Centre Africain de Recherche sur la Conversion d'Énergie (CARCE-DON ELOHIM) et de Naturel agrofood pour les implications dans la conception des dispositifs et les expérimentations.

RÉFÉRENCES

[1] **FAO (2011)**. Global food losses and food waste. Study conducted by J. Gustavsson, C. Cederberg & U. Sonesson for the International Congress at Interpack, Düsseldorf, Germany, : <https://www.researchgate.net/publication/267919405>, 25p.

[2] **GOUDJINOU, C. (2018)**. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de *Moringa oleifera* (Lam) : Etat des lieux, caractérisation thermophysique, physico-chimique fonctionnelle de la poudre dérivée, Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi (UAC), spécialité : Biochimie, Sciences Alimentaires et Génie des procédés, FAST, 200p.

[3] **GOUDJINOU, C., AHOUANNOU, C., CHAFFA, G., SOUMANOU, M. M. (2017)**. Thermophysical characterization of the powder resulting from the solar drying of the *Moringa oleifera* leaves. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 9 (4): 28-47

[4] **NOUKPOZOUNKOU, M. S. P., GOUGBE, A., ABOUDOU, K., GOUDJINOU, C. and SOUMANOU, M. M. (2021)**. Connaissances endogènes et contraintes post-récoltes liées aux techniques de conservation des variétés de tomate produites au Sud-Bénin. *Afrique Science*.(6)17, 124–137.

[5] **DIAZ-MAROTO, M. C., PEREZ-COELLO, M. S. and CABEZUDO, M. D. (2002)**. Effect of different drying methods on the volatile components of parsley (*Petroselinum crispum*). *European Food Research and Technology*. doi: 10.1007/s00217-002-0529-7, (3) 215, 227–300.

[6] **KANMOGNE, A. (2011)**. Appui au Développement des pays tropicaux. *éditions universitaires européenne GmbH and Co. KG*. ISBN : 978-613-1-55816-0, 190 p.

[7] **WISNIEWSKI, G. (1999)**. Market development of the solar crops drying technologies in Poland and Europe. *Renewable Energy*. (1)16, 1278 – 1283.

[8] **VIDYA, R. S. R., MEENAKSHI, R. R., and SIVA, E. R. (2013)**. Design and fabrication of efficient solar dryer. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. ISSN: 2248-9622, (6) 3,1445-1458.

[9] **THAMKAEW, G., SJÖHOLM, I., and GALINDO, F. G. (2020)**. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. DOI : 10.1080/10408398.2020.1765309, ISSN: 1040-8398, 1-24.

[10] **AHOUANNOU, C. (2001)**. Etude du séchage de produits agroalimentaires tropicaux : application au manioc, gingembre, gombo et piment. Thèse de doctorat, Université Nationale du Bénin, spécialité : Energétique, C.P.U/ FAST, N° d'ordre : 08, 219p.

[11] **DADDA, B., KHERROUR, S. and SERIR, L. (2008)**. Réalisation d'un séchoir solaire indirect. *Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger*. 127 – 134.

[12] **AOAC. (1995)**. Official Methods of.pdf. In: Official Methods of Analysis. *Arlington*.

[13] **ASSOGBA, W., BALLOGOU, V. Y., ANIHOUI, V. and SOUMANOU, M. M. (2017)**. Effet de la pré-cuisson sur les caractéristiques physiques, texturales et sensorielles du ablo à base de maïs et de riz. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*. 82, ISSN sur papier (on hard copy) : 1025-2355 et ISSN en ligne (on line) : 1840-7099.

[14] **AGASSOUNON, D. T. M., GOMEZ, S., TCHOBO, F. P., SOUMANOU, M. M. and TOUKOUROU, F. (2012)**. Essai de conservation de la tomate par la technique de la déshydratation imprégnation par immersion (DII). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. (2) 6, 657-669.

[15] **BHARDWAJ, A. K., CHAUHAN, R., KUMAR, R., SETHI, M. and RANA, A. (2017)**. Experimental investigation of an indirect solar dryer integrated with phase change material for drying Valeriana jatamansi (medicinal herb). *Case Stu. Ther. Eng.* <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2017.07.009>, 10, 302-314.

[16] **BALA, B. K. and JANJAI, S. (2012)**. Solar drying technology: potentials and developments. *Energy, Environment and Sustainable Development*, https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0109-4_10 ,69–98.

- [17] RABHA, D. K., MUTHUKUMAR, P. and SOMAYAJI, C. (2017). Experimental investigation of thinlayer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer. *Renew. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.091>, (1) 105, 583-589.
- [18] WANG, W., LI, M. and HASSANIEN, R. (2018). Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango. *Appl. Therm. Eng.* 134, 310-321.
- [19] LINGAYAT, A., CHANDRAMOHAN, V.P. and RAJU, V. R. K. (2017). Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana drying. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.041>, 109, 409 – 416.
- [20] ABUBAKAR, S., UMARU, S., KAISAN, M.U., UMAR, U.A., ASHOK, B. and NANTHAGOPAL, K. (2018). Development and performance comparison of mixed-mode solar crop dryers with and without thermal storage. *Renewable Energy*. doi: 10.1016/j.renene.2018.05.049, (18), 1-37.
- [21] HASTÜRK-ŞAHİN, F., ÜLGER, P., AKTAŞ, T. and ORAK, H. (2010). Effects of Different Drying Techniques on Some Nutritional Components of Tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Journal of Agricultural Machinery Science*. (1) 6, 71– 78.
- [22] LAMLOUMI, R., HASSINI, L., LECOMTE-NANA, G. L., EL CAFSI, M. A. and SMITH, D. S. (2015). Modélisation de l'état hydro-viscoélastique d'un produit déformable et saturé au cours du séchage convectif. *5ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage*. Ouargla (Algérie). 7p.
- [23] SSEMWANGA, M., NAKIGULI, F. and NASEJJE, S. (2020). Drying performance and economic analysis of novel hybrid passive mode and active-mode solar dryers for drying fruits in East Africa. *Journal of Stored Products Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101634> 88:101634, 1-11.
- [24] NDJOUENKEU, R. 2002. Opportunité d'amélioration de la qualité de la poudre de tomate par couplage entre la déshydratation osmotique et le séchage. *Actes du colloque. Garoua. Cameroun* 27-31 mai 2002.
- [25] OBADINA, A., IBRAHIM, J. and ADEKOYA, I. (2018). Influence of drying temperature and storage period on the quality of cherry and plum tomato powder. *Food Sci Nutr*. <https://doi.org/10.1002/fsn3.658>, (6), 1146–1153.
- [26] URBANYI, G. and HORTI, K. (1989). Color and carotenoids content of quick-frozen tomato cubes during frozen storage. *Acta Alimentaria*. (18), 247–267.
- [27] D'SOUZA, M. C., SINGHQ, S. and INGLE, M. (1992). Lycopene concentration of tomato fruit can be estimated from chromaticity values. *Horticulture Science*. (27), 465–466.
- [28] GOUGBE, S. A., NOUKPOZOUNKOU, M. S. P., ABOUDOU, K., YESSOUFOU, A. A. O., CHATIGRE, K. O. and SOUMANOU, M. M. (2020). Effets des traitements phytosanitaires sur les propriétés physicochimiques fonctionnelles et organoleptiques des graines de niébé cultivées au Bénin. *Afrique Science*. (6) 17, 124-137.
- [29] UMESH, T. and KARALE, S.R. (2013). A review paper on Solar Dryer, *International Journal of Engineering Research and Applications(IJERA)*. ISSN: 2248-9622, (2)3, 896-902.
- [30] CHOUICHA, S., BOUBEKRI, A., MENNOUCHE, D., and HAFED BERRBEUH, M. (2013). Solar drying of sliced potatoes an experimental investigation, Terra Green 13 International Conference 2013 Advancements in Renewable Energy and Clean Environment. *Science Direct*. doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.144 ,36, 1276 – 1285.
- [31] HOUSSOU, P. A. F., AHOYO-ADJOVI, N. R., HOUNYEVOU-KLOTOE, A., DANSOU, V., DJIVOH, H., HOTEJNI, A. B., METOHOUE, R., AKISSOE, N. H., and MENSAH, G. A. (2016). Evaluation des performances d'un séchoir hybride pour le séchage de yèkè-yèkè (couscous de maïs) et de gambari-lifin (farine raffinée de maïs) au Benin. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.* ISSN 1813-3290, <http://www.revist.ci>, 151 – 159.
- [32] MISS, S. B. M., and BUTALE, M. C. (2019). A review paper on different drying methods. *International Journal of Engineering Research & Technology(IJERT)*. ISSN: 2278-0181, (05) 8, 211-216.
- [33] DADAN, M., RYBAK, K., WIKTOR, A., NOWACKA, M., ZUBERNIK, J. and WITROWA, R. (2018). Selected chemical composition changes in microwave-convective dried parsley leaves affected by ultrasound and steaming pre-treatments: an optimization approach. *Food Chemistry*. doi: 10.1016/j.foodchem.061, 239, 242–251.