



Modélisation physique et mathématique du séchoir solaire indirect

[Physical and mathematical modeling of the indirect solar dryer]

Mbaya Ilunga Edouard^{1*}, & Binda Sombani Mafille²

¹Institut Supérieur de Techniques Appliquées de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo

²Institut Supérieur Pédagogique de Kiri, Mayi Ndombe, République Démocratique du Congo

Résumé

Le séchoir solaire indirect permet le processus allant du captage des rayons solaires à leurs conversions en énergie thermique. Plusieurs travaux de recherche scientifique ont démontré que ce processus est plus attractif que le séchage à l'air libre de part son aptitude de sécher les denrées alimentaires en gardant leurs capacités nutritionnelles. Pour ressortir la dimension scientifique de cette recherche, les appareils Solarimètre (MGE de type DS A 120), le thermocouple de types K a et l'Anémomètre (Testo mode 445) ont été exploités pour mesurer les rayons solaires, la température et l'humidité. Les valeurs obtenues après mesure ont permis de fixer la condition aux limites de notre séchoir solaire indirect qui après simulation dans le Logiciel Matrix Laboratory (MatLab), nous avons trouvé les résultats sous forme des graphiques qui ont été interprétés et discutés avec ceux trouvés par d'autres chercheurs.

Mots clés : Transfert de chaleur, flux de rayonnement, bilan massique et énergétique, cinétique de séchage, rendement thermique.

Abstract

The indirect solar dryer enables the process from capturing the sun's rays to converting them into thermal energy. A number of scientific studies have demonstrated that this process is more attractive than open-air drying, thanks to its ability to dry foodstuffs while preserving their nutritional value. To highlight the scientific dimension of this research, Solarimeter (MGE type DS A 120), thermocouple type K a and Anemometer (Testo mode 445) were used to measure solar radiation, temperature and humidity. The values obtained after measurement were used to set the boundary condition of our indirect solar dryer, which after simulation in the Matrix Laboratory Software (MatLab), we found the results in the form of graphs that were interpreted and discussed with those found by other researchers.

Key words: Heat transfer, radiation flux, mass and energy balance, drying kinetics, thermal efficiency.

1. Introduction

Il n'est pas à démontrer combien la consommation des denrées alimentaires est indispensable dans la sociétés humaines et autres, il s'avère, qu'ils sont produits, compte tenu de l'immensité de la planète terre, l'assurance de leurs conservations une fois produits constitue un enjeux à investigué bien que quelques réponses des chercheurs ont été données à ce problème (Bimbenet, 2002).

Les uns se sont prononcés pour le système de conservation à froid et les autres sur le système de conservation à chaud. La technologie de séchage

étant un compromis technique et économique (Oswin, 1949), la conservation à chaud a retenue notre attention, plus précisément aux apports dégagés sur les séchoirs solaires indirects qui sont des systèmes conçus de manière à pouvoir capter les rayons solaires afin de les convertir en énergie thermique (chaleur) pour sécher les denrées alimentaires à moindre coût tout en gardant les propriétés organoleptiques du produit afin de préserver la santé de l'homme (Kapderon, 1988; Verma et al., 1985).

Le séchage étant fonction des conditions atmosphériques (Iglesias & Chirife, 1979), le contrôle de son déroulement dans le séchoir solaire

*Auteur correspondant: Mbaya Ilunga Edouard, (edombayagmail.com). Tél. : (+243) 823 046 722

<https://orcid.org/0009-0001-7641-3149>; Reçu le 05/12/2024; Révisé le 06/01/2025 ; Accepté le 03/02/2025

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.025.v4.i1.127>

Copyright: ©2025 Mbaya & Binda. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-NC-SA 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

indirect constitue un obstacle empêchant la maîtrise comportementale de la variation de la température en fonction du temps dans le séchoir, la variation de la température en fonction de la longueur, la variation de la conductivité thermique en fonction du temps, la variation de la température en fonction de la conductivité thermique (Boulemtofer & Semmar, 1999; Saf & Reddan, 2018). Ce qui ne facilite pas la connaissance de son bilan énergétique notamment : le bilan énergétique de sa boîte extérieure, le bilan énergétique de sa boîte interne, le bilan énergétique de l'air asséchant.

Pour pallier cette difficulté, nous avons pensé modéliser physiquement et mathématiquement le séchoir solaire indirect pour ressortir la description scientifique de ses constituants en vue de définir son comportement en service.

2. Matériel et méthodes

Ce travail étant inscrit dans la dynamique de modéliser le séchoir solaire et de le soumettre aux contraintes en vue de ressortir son comportement en service, les techniques expérimentales capables de traduire la réalité directement accessible au thème de notre recherche à l'échelle de laboratoire, constituent la principale méthode utilisée pour examiner le comportement physique et mathématique du séchoir solaire.

L'exploitation de L'appareil Solarimètre (MGE de type DS A 120) a permis de mesurer le rayonnement solaire. Le thermocouple de types K a facilité la mesure de la température et l'appareil Anémomètre (Testo mode 445) nous a permis de mesurer l'humidité de notre milieu d'étude.

2.1. Modélisation physique du séchoir solaire indirect

La figure 1 ci-dessous établie avec le logiciel SolidWokes constitue le modèle physique du séchoir solaire indirect étudié.

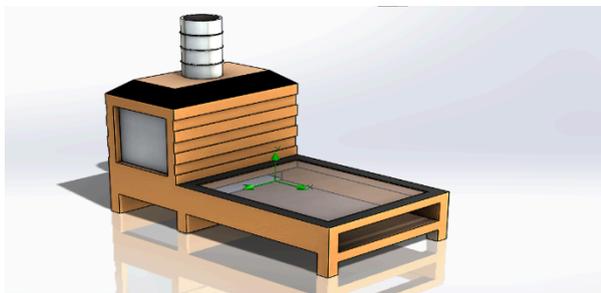


Figure 1. Vue d'ensemble du séchoir solaire indirecte en 3D

La figure 1 indique la vue d'ensemble du séchoir solaire indirect.

La démonstration de ses différentes vue est représentée dans les coupes de la figure 2.



Figure 2. Coupes du séchoir solaire indirect

Cet ensemble de vue vient de la figure 1 qui a pour caractéristiques physiques :

1. Les propriétés physiques et thermiques fluide caloporteur (air) sont données en fonction de la Température maximale (Tmax) : 180°C et de la Température minimale (Tmin) : 130°C ;
2. Longueur séchoir solaire (L) : 1m ;
3. Largeur du séchoir solaire (l) : 0,5m ;
4. Épaisseur de l'absorbant : 0,2 mm.

2.2. Modélisation mathématique séchoir solaire indirect

Le modèle mathématique à établir, émanera de la figure 1. Cependant, les grandeurs physiques et dimensions qui la caractérisent constituent des hypothèses dans cette étude.

Il est à noter que la démonstration de l'état fonctionnel du séchoir solaire indirect nécessite l'exploitation des équations diffusifs, par le fait que ces modèles constituent le point de départ développant la théorie de séchage. Ils sont basés sur la loi de Fick. Cette dernière décrit l'origine des mouvements moléculaires :

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \nabla(D \cdot \nabla x) \quad (1)$$

D : coefficient de diffusion de l'eau dans le produit. Il est important de savoir que ce coefficient est fonction de L'humidité (m²/s) ;

X : Teneur en eau du produit ;

T : le temps ;

En supposant que la diffusivité massique est constante, l'équation devient :

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \quad (2)$$

Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse sont des modèles qui détaillent le plus fine des phénomènes mis en jeu au cours du séchage. Ils permettent de séparer les phénomènes de transport internes en utilisant un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur.

2.3. Principe de conservation d'énergie

Pour évaluer le bilan énergétique du séchoir solaire dû indirect, nous recourons au premier principe de la thermodynamique portant sur la conservation de l'énergie. Ce principe voudrait qu'au cours d'une transformation quelconque d'un système, que la variation de son énergie soit égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, par transfert thermique (chaleur) et transfert mécanique (travail)» tel qu'énonce la relation 3 :

$$H = U + P \times V \quad (3)$$

2.4. Bilan énergétique de la boîte extérieure

La boîte extérieure (box en bois) réalise des échanges de chaleur par conduction avec la paroi isolante, par rayonnement avec la voûte céleste. L'équation 4 exprime le bilan d'énergie transféré :

$$\rho_e e_{pe} C_{ppe} \frac{dT_{pe}}{dt} = h_d(T_{pi} - T_{pe}) - h_w(T_{pe} - T_{ab}) + h_r(T_{pe} - T_c) \quad (4)$$

ρ_e : masse volumique de la paroi externe isolante de l'armoire de séchage (Kg.m⁻³);

e_{pe} : épaisseur de la paroi isolante de l'armoire de séchage (m);

C_{ppe} : capacité calorifique massique à pression constante de la paroi interne de l'armoire de séchage (J.Kg⁻¹K);

h_r : coefficient d'échange radioactif entre voûte céleste et la paroi isolante de l'armoire de séchage;

h_d : Coefficient d'échange conductif à travers la paroi isolante de la boîte de séchage (W.m⁻²K⁻¹);

h_w : Coefficient d'échange de chaleur par effet de vent entre l'air extérieur et la paroi isolante de l'armoire de séchage

(W.m⁻².K⁻¹). **2.5. Bilan énergétique de la boîte interne**

La boîte interne (box en alucobond), réalise deux types de transferts thermiques : échange convectif avec l'air et échange conductif avec la paroi isolante. L'équation 5 donne le bilan d'énergie transférée :

$$\rho_i e_{pi} C_{ppi} \frac{dT_{pi}}{dt} = h_c(T_a - T_{pi}) + h_d(T_{pi} - T_{pe}) \quad (5)$$

Avec :

ρ_i : masse volumique de la paroi interne métallique de l'armoire de séchage (Kg.m⁻³);

h_d : coefficient d'échange conductif à travers la paroi isolante de la boîte de séchage;

h_c : Coefficient d'échange convectif entre l'air et la face interne de l'armoire de séchage (W.m⁻².K⁻¹);

e_{pi} : Epaisseur de la paroi interne de l'armoire de séchage (m);

C_{ppi} : Capacité calorifique massique à pression constante de la paroi interne de l'armoire de séchage (J.kg⁻¹.K).

2.6. Bilan énergétique de l'air asséchant

L'air circulant dans la chambre de séchage réalise des échanges thermiques par convection d'une part avec la face interne de la chambre et d'autre part avec le produit à sécher. L'équation 6 exprime l'énergie globale transférée :

$$\Delta x. \dot{m}_a C_{pa} \frac{dT_a}{dx} = S_{a-f} h_{cf}(T_a - T_f) - S_{a-pi} h_c(T_a - T_{pi}) \quad (6)$$

C_{pa} : capacité calorifique massique à pression constante de l'air;

T_{pi} : température de la paroi interne (°K);

T_f : température du produit (°K);

h_{cf} : coefficient d'échange convectif entre l'aire et le produit (w.m²K⁻¹);

\dot{m}_a : Débit massique de l'air asséchant (kg/s);

S_{a-f} : Surface d'échange par convection entre l'air et le produit (m²);

h_c : Coefficient d'échange convectif entre l'air et la face interne de l'armoire de séchage (W.m⁻².K⁻¹).

2.7. Bilan énergétique du produit

Afin de bien sécher, le produit échange la chaleur par convection avec l'air. La relation 7 décrit le bilan d'énergie transféré entre le produit et l'air :

$$m_f \cdot C_{pf} \frac{dT_f}{dt} = S_{a-f} \cdot h_{cf} (T_a - T_f) - L_v \cdot \dot{m}_e \quad (7)$$

Avec :

C_{pf} : capacité calorifique massique à pression constante de la paroi interne de l'armoire de séchage (j.Kg⁻¹K).

3. Résultats

Après avoir soumis le séchoir solaire aux contraintes à travers le logiciel Matlab, nous avons enregistré ce qui suit :

Après avoir soumis le séchoir solaire aux contraintes à travers le logiciel Matlab, nous avons enregistré ce qui suit :

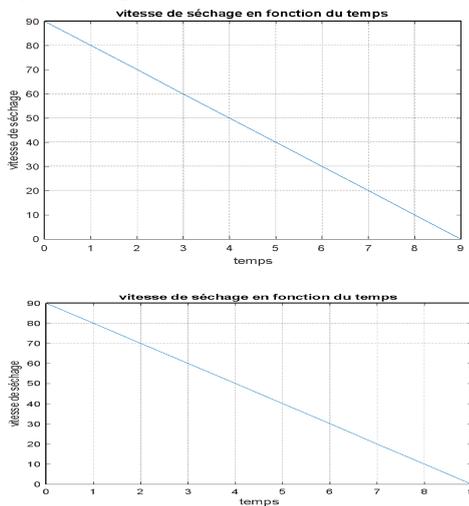


Figure 3. Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps

La figure 3 montre la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.

Nous constatons que la courbe est linéaire en fonction du temps. Ce qui prouve que la vitesse varie proportionnellement avec le temps. Donc notre séchoir à une vitesse normale pour le séchage

des denrées alimentaires.

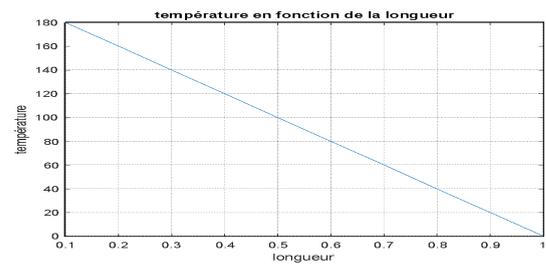


Figure 4. Variation de la température en fonction de la longueur

La figure 4 illustre la variation de la température en fonction de la longueur du séchoir solaire indirect.

La courbe montre comment la température varie en fonction du temps dans le séchoir solaire indirect. Cette variation de la température en fonction de la longueur à caractère linéaire indique qu'une fois la longueur et grande la température augmente encore plus. Ce qui atteste que le fonctionnement de notre séchoir solaire est fiable.

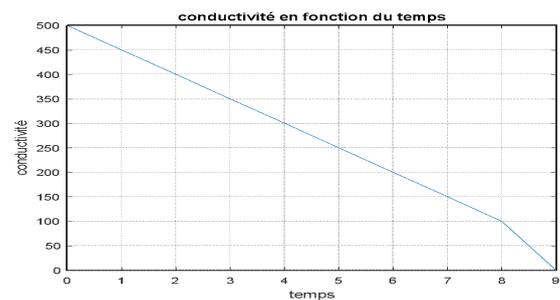


Figure 5. Variation de la Conductivité thermique en fonction du temps

La figure 5 montre la variation de la conductivité thermique en fonction du temps.

Il est à remarquer que la courbe est linéaire. Ce qui prouve que notre séchoir est fiable. Il est capable d'assurer le transport de l'énergie thermique à partir du capteur solaire jusqu'à la chambre de séchage. Il y a lieu de retenir que la perte de l'énergie thermique est minimisable dans le séchoir.

Ce constat démontre que le séchoir résiste à toutes les contraintes et qu'il est capable de réaliser ses tâches de sécher les denrées alimentaires sans faille.

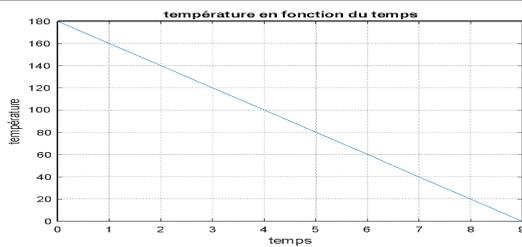


Figure 6. Variation de la température en fonction du temps dans le séchoir solaire indirect.

La figure 6 montre la variation de la température en fonction du temps dans le séchoir solaire indirect.

La courbe laisse constater la proportionnalité entre la température et le temps. Ce qui atteste que la maximisation de l'opération de séchage est dépendante du seuil de la température développée par notre séchoir solaire à l'instant donné.

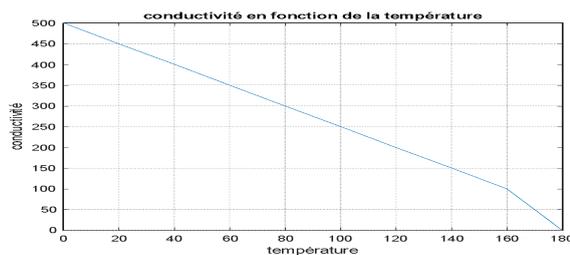


Figure 7. Variation de la conductivité en fonction de la température

La figure 7 montre la variation de la conductivité en fonction de la température du séchoir solaire indirect.

Il sied de remarquer que cette courbe a produit le même comportement que celle de la figure 4 de cette étude tracée pour illustrer la variation de la conductivité thermique en fonction du temps. Ce qui rend la fiabilité de notre séchoir solaire indirect redoutable sur le plan pratique.

4. Discussion

Après avoir mené cette étude expérimentale qui a démontré que l'interaction entre matériaux et rayonnements solaires déclenche les phénomènes de réflexion, réflexion et de l'absorption qui peuvent générer les effets thermiques.

Les expériences à l'échelle de laboratoire ont ressorti les résultats dégageant la vitesse de séchage en fonction du temps allant de 0 à 90 m/s pour la longueur et 9 à 90 min pour le temps. La variation de la température en fonction de la longueur va de 0 à 180 °C pour la température et de 0 à 1 m pour la longueur. La variation de la conductivité thermique en fonction du temps allant de 0 à 500 °C pour la conductivité thermique et de 9 à 500 min pour le temps. La variation de la température en fonction du temps va de 180°C pour la température et de 9 à 180 min pour le temps. La variation de la conductivité thermique en fonction de la température allant de 0 à 500 °C pour la conductivité thermique et de 180 à 500 °C pour la température. Il ressort que ces résultats sous forme des graphiques sont linéaires et la variation des grandeurs physiques indique la proportionnelle entre elles.

Dans ces expériences Boughali (2010) a trouvé les résultats d'une vitesse maximum de 2 m/s, température de 75 °C, temps 75 min pour un séchoir solaire indirect en service. A cet effet Charreau & Cavaille (1995) énoncent que le processus de séchage se déroulant au sein du caisson de dessiccation peut être simulé par deux phénomènes physiques : un transfert de chaleur et un transfert de masse. Leur étude nécessite la connaissance du coefficient de chaleur et des surfaces d'échanges.

Notre travail étant basé sur la recherche du comportement en service du séchoir solaire indirect qui est un système de transformation des rayons solaires en chaleur pour sécher les produits agricoles et autres, comparant la performance de notre séchoir solaire indirect partant des résultats de la vitesse, température et temps trouvés par nous à ceux trouvés par Boughali (2010) et l'énoncé de Charreau & Cavaille (1995), il y a lieu de constater que les résultats de Boughali (2010) entrent dans la fourchette de nos résultats qui répondent également à l'exigence de l'énoncé de Charreau & Cavaille (1995). D'une manière globale, nos résultats suivent l'esprit de la courbe des périodes cinétiques de séchage d'un produit humides dans un séchoir solaire indirect optimal (figure 8).

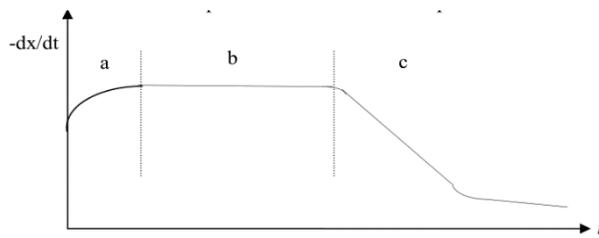


Figure 8. Périodes du séchage

La figure 8 illustre les périodes de séchage.

En scrutant cette courbe, nous remarquons que la région (a) constitue la période de mise en température, la région (b) la période à allure constante, la région (c) période de ralentissement.

Cette figure à caractère linéaire fondée sur la proportionnalité traduit la cohérence de nos résultats sous forme de graphique qui répond également au principe de collecte de l'énergie solaire pour chauffer le volume d'air avec des capteurs et conduire l'air chaud du capteur vers la chambre de séchage pour sécher les aliments évoqué par Mbaya & Binda (2015) Ilunga Edouard.

5. Conclusion

Nous voici à la conclusion de cette étude qui a relevé que le séchage solaire a plusieurs organes concourant à son activité allant du captage des rayons solaires à leurs conversions en énergie thermique. Pour matérialiser sa raison d'être.

La diffusion de la chaleur étant faite au sein du séchoir solaire indirect de manière régulière, la modélisation physique a permis de le représenter et la modélisation mathématique a facilité sa mise en équation qui a conduit à sa soumission aux contraintes pour définir son comportement une fois en service afin de connaître son bilan énergétique. Il ressort de ce dernier que la variation du Bilan énergétique de sa boîte extérieure, sa boîte interne, de l'air asséchant, du produit à sécher sont fonction des rayonnements solaires.

Les résultats sous formes des graphiques trouvés ont traduit la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps, la variation de la température en fonction de la longueur, la variation de la conductivité thermique en fonction du temps, la variation de la température en fonction du temps, la variation de la conductivité thermique en fonction de la température du séchoir solaire indirect.

Remerciement

La connaissance de la modélisation physique et mathématique du séchoir solaire qui a fait l'objet de cette investigation scientifique s'est réalisée avec le concours des autres. C'est ainsi que nous tenons à remercier tous ceux qui ont de près ou de loin contribué à la matérialisation de ce travail.

Références bibliographiques

- Bimbenet, J.J. (2002). *Génie des procédés alimentaires*. Paris, Dunod.
- Boughali, S. (2010). *Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques* [Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna].
- Boulemtoufer, A., & Semmar, D. (1999). Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect. *Rev. Energ. Ren. Valorisation*, 97-100.
- Charreau, A. & Cavaille, R. (1995). Séchage. Théorie et calculs. *L'expertise technique et scientifique de référence*, 1, 1-23.
- Iglesias, H.A., & Chirife, J. (1979). On the local isotherm concept and modes of moisture binding in food products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 24,24-77.
- Kapderou, M. (1988). *Atlas solaire de l'Algérie tome 1 modèles théorique et expérimentaux-volume 2*. Algérie, Office des publications universitaires.
- Mbaya, I. & Binda, S.M. (2015). *Analyse de l'interaction rayons solaires structures dans le système photovoltaïque*.
- Oswin, C.R. (1949). The Kinetics of package life III. Isotherm. *Journal of Society of chemistry*, 65,419-42.
- Saf, A. & Reddam, S. (2018). *Technologies de séchage. Etude de cas : séchage de deux matrices végétales par étude*.
- Verma, L.R., Bucklin, R.A., Endan, J.B. & Wratten, F.T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28, 296 – 301.