

CONCEPTION NUMÉRIQUE D'UN SÉCHOIR SOLAIRE TYPE SERRE

**Daouda KARIDIOULA¹, Djedjro C. AKMEL², Kodjo KESSY¹,
N. Emmanuel ASSIDJO^{2*} et Albert TROKOUREY¹**

¹*Université Félix Houphouët Boigny (UFHB), Laboratoire de chimie –
physique, Abidjan, Côte d'Ivoire*

²*Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB),
Laboratoire des procédés industriels de synthèse et de l'environnement,
Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

*Correspondance, e-mail : assidjo@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Cette étude théorique porte sur la modélisation d'un séchoir solaire de type serre. Elle a consisté à développer un modèle mathématique permettant de décrire le comportement dynamique et le pouvoir calorifique des séchoirs. Ce modèle mathématique a été obtenu par application des lois de conservation d'énergie et de quantité de mouvement au niveau des différents sous domaines et limites constituant le séchoir solaire. Il est donc constitué d'un système de dix-huit équations non linéaires et fortement couplées. La résolution de ce système d'équation s'est faite par la méthode des éléments finis avec le logiciel Comsol Multiphysics 4.0. Nous avons obtenu des distributions spatiotemporelles de température et de champs de vitesse après 9 heures de simulation. Les résultats montrent que les zones les plus chaudes et fluides sont en hauteur et au centre du séchoir. Les profils de température et de vitesse moyenne présentent les mêmes allures que celles obtenues par d'autres.

Mots-clés : *séchoir solaire, transfert de chaleur, quantité de mouvement, fluide.*

ABSTRACT

Numerical design of a solar dryer type greenhouse

This theoretical study deals with solar drier modeling of greenhouse type. Consisted in mathematical model development enabling the description of dynamical behavior and calorific value of driers.

This model was obtained using energy and momentum balance laws inside different sub domains and limits of solar drier. It was sets of 18 non-linear and interlining equations. Herein, these equations sets were solved using the finite element method implemented in the Comsol multiphysics 4.0 software. A 9 hours simulation was made and temperature distribution in time and space on the one hand and velocities streamline were obtained. These results point out that hottest and fluids zones are at the centre and at the top of drier. Temperature profiles and mean velocities obtained herein are comparable to those of other authors.

Keywords : *solar drier, heat transfer, momentum, fluid.*

Nomenclature

ρ : Masse volumique (kg/m³)

C_p : Capacité calorifique à pression constante J/ (kg.K)

k : Conductivité thermique W/(m.K)

q : Source de chaleur ou densité volumique d'énergie générée (w/m³)

ε : Coefficient d'émission

G : Irradiation en provenance d'une surface (W/m²)

σ : Constante de Stefan (W.m⁻².K⁻⁴)

h_e : coefficient de transfert de chaleur de l'air extérieur (W.m⁻².K)

T : Température (K)

x : Variable d'espace dans la direction horizontale (m)

y : Variable d'espace dans la direction verticale (m)

u : vitesse suivant x de l'air au sein du séchoir (m/s)

v : vitesse suivant y de l'air au sein du séchoir (m/s)

t : temps (h)

η : viscosité dynamique du fluide (air) (Pa.s)

Indices

$lamp$: lampe

air : air

s : sortie

e : entrée

amb : ambient

0 : initiale

I - INTRODUCTION

Le séchage est une opération importante dans le domaine agro-alimentaire et industriel. Cette opération qui consiste à éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un produit humide, constitue un moyen de conservation ou une étape dans la transformation de certains produits [1-4]. Cependant la procédure est encore archaïque ou très onéreuse surtout pour les pays en développement où le secteur d'électricité est très peu développé. A cela s'ajoute la flambée des prix et la pénurie de carburants utilisés comme source d'énergie. Ces raisons ont incité diverses études et recherches profondes sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source énergétique alternative, particulièrement dans les pays en développement [5]. En effet, dans ces pays, bien que le degré d'ensoleillement soit élevé tout au long de l'année, l'utilisation des méthodes traditionnelles s'impose toujours. L'opération de séchage doit être réalisée en optimisant la quantité de chaleur nécessaire pour obtenir un produit de qualité avec une dépense globale minimale d'énergie afin de minimiser la perte non seulement au niveau de la quantité, mais aussi au niveau de la qualité du produit séché.

Bien qu'on ait observé un accroissement marqué des recherches sur les séchoirs solaires, l'effort demeure modeste par comparaison à la complexité, à la diversité et à la taille du problème. Il n'est donc pas surprenant que la plupart des séchoirs solaires mis au point ne soient ni performants ni acceptés par leurs utilisateurs prévus. On explique principalement ce faible rendement par la discordance que l'on retrouve habituellement entre la température de travail et le débit de l'air circulant dans les séchoirs. La faible popularité chez les agriculteurs est habituellement liée au coût du système de séchage ainsi qu'aux obstacles sociaux ignorés ou négligés à l'étape de la conception [6]. Les ouvrages publiés n'abordent généralement que la construction et les résultats des essais et omettent souvent des données qui permettraient d'améliorer le séchoir ou de l'adapter à un autre emplacement ou à une autre culture. Il manque également de données de base sur le fonctionnement des séchoirs solaires à circulation d'air naturel [6]. Notre travail s'inscrit donc dans une optique d'amélioration et d'optimisation des méthodes de dimensionnement et de conception de séchoirs solaires, en mettant l'accent sur l'utilisation d'outils de simulation numérique avec le logiciel Comsol Multiphysics 4.0. Cette étude est basée sur un modèle mathématique permettant de décrire le comportement dynamique et le pouvoir calorifique des séchoirs solaires de type serre.

II - MÉTHODOLOGIE

II-1. Description du séchoir solaire retenu

En vue de faciliter sa construction et de le rendre accessible aux agriculteurs, nous avons opté pour un modèle de séchoir classique et assez simple. Il s'agit d'un séchoir solaire direct à vocation agricole destiné au séchage de produits agricoles tels que le cacao et éventuellement à leur conservation en sacs. Le dispositif utilisé est présenté sur la **Figure 1**. La structure mise en place est une serre de longueur $L = 3\text{m}$, de largeur $l = 3\text{m}$ et de hauteur $h = 2,5\text{m}$.

Celle-ci respecte les recommandations concernant l'orientation des serres [7], à savoir :

- deux sortes d'ouvertures (entrée et sortie d'air) pratiquées sur les parois latérales perpendiculaires à la direction Nord-Sud.
- Les entrées d'air sont au niveau de la paroi recevant le vent dominant : direction nord-sud et la sortie sur la paroi opposée.
- Le grand axe de la serre est parallèle à la direction Est-Ouest.

Les parois latérales et les capteurs sont en vitre à l'exception de la surface ouest qui est en plastique transparent. L'inclinaison des capteurs est de 18 degrés par rapport à l'horizontale.



Figure 1 : Serre expérimentale

II-2. Mise en équation

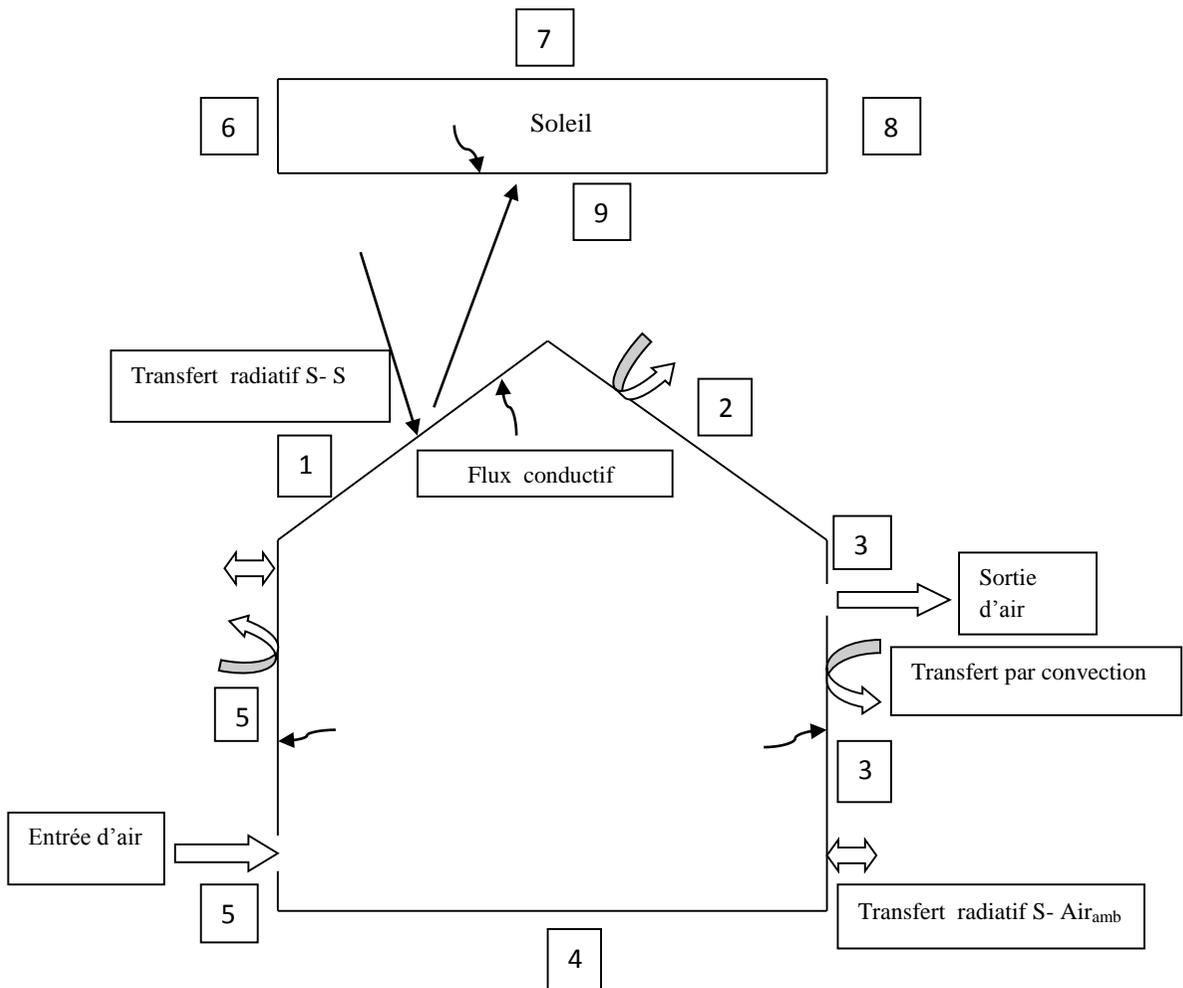


Figure 2 : *Eléments et mécanismes à prendre en compte dans un modèle de séchoir solaire*

La modélisation mathématique des transferts et du comportement du fluide au sein du séchoir peut être établie à partir des bilans énergétiques et de quantités de mouvement traduisant la conservation de l'énergie et la dynamique des fluides. Dans un souci de simplification, le modèle proposé est basé sur les hypothèses suivantes :

- Les propriétés tant géométriques que physiques de la serre sont supposées uniformes dans la direction de son grand axe.

La serre est donc assimilée à sa section droite transversale et les effets de bord liés aux extrémités sont négligés.

- la couverture de la serre est considérée comme une surface de faible épaisseur où l'échange par conduction entre la face extérieure et intérieure peut être négligé.
- les radiations solaires captées par les faces latérales de la serre sont négligées.

Les hypothèses susmentionnées permettent la schématisation simplifiée (**Figure 2**) du séchoir solaire et des transferts thermiques intervenant.

II-3. Systèmes d'équations

Le système d'équations décrivant la conservation d'énergie, la continuité et le transport de quantité de mouvement pour les sous domaines et limites du séchoir solaire s'écrit :

II-3-1. Equations de conservation d'énergie et conditions aux limites

Ces équations sont obtenues en appliquant la loi de conservation d'énergie au niveau des sous domaines ainsi que leurs différentes limites.

➤ Sous domaine 2 (soleil)

$$\rho_{lamp} C_{p_{lamp}} \frac{\partial T_{II}}{\partial t} - k_{lamp} \left(\frac{\partial^2 T_{II}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial y^2} \right) = q_{lamp} \quad (1)$$

Avec $0 \leq y \leq e_{lamp} = 0,5 \text{ m}$ et $0 \leq x \leq 3 \text{ m}$ pour le sous domaine 2

• Limites du sous domaine 2

Limite 9

$$k_{lamp} \left(\frac{\partial T_9}{\partial y} \right) = \varepsilon (G - \sigma T_9^4) \quad (2)$$

Avec $0 \leq y \leq e_{lamp} = 0,5 \text{ m}$ pour cette limite

Limites 6, 7 et 8

$$T = T_0 \quad (3)$$

➤ Sous domaine I (chambre de séchage)

$$\rho_{air} C_{p_{air}} \frac{\partial T_I}{\partial t} - k_{air} \left(\frac{\partial^2 T_I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_I}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4)$$

Avec $0 \leq x \leq 3 \text{ m}$; $0 \leq y \leq 2,5 \text{ m}$ pour cet sous domaine

• **Limites du sous domaine I**

Limites 1 et 2

$$-K_{air} \cos\beta \left(\frac{\partial T_1}{\partial x}\right) + K_{air} \sin\beta \left(\frac{\partial T_1}{\partial y}\right) = h_e (T_0 - T_1) + \varepsilon (G - \sigma T_1^4) \quad (5)$$

$$K_{air} \cos\beta \left(\frac{\partial T_2}{\partial x}\right) + K_{air} \sin\beta \left(\frac{\partial T_2}{\partial y}\right) = h_e (T_0 - T_2) + \varepsilon (G - \sigma T_2^4) \quad (6)$$

Pour ces limites du fait de l'inclinaison d'un angle β on a :

$0 \leq y \leq 0,5 \text{ m}$ et $0 \leq x \leq 3 \text{ m}$ et $\beta = \pi/10$

Limites 3, 5, 3' et 5'

$$-K_{air} \left(\frac{\partial T_3}{\partial x}\right) = h_e (T_0 - T_3) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T_3^4) \quad (7)$$

$$-K_{air} \left(\frac{\partial T_5}{\partial x}\right) = h_e (T_0 - T_5) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T_5^4) \quad (8)$$

$$-K_{air} \left(\frac{\partial T_{3'}}{\partial x}\right) = h_e (T_0 - T_{3'}) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T_{3'}^4) \quad (9)$$

$$-K_{air} \left(\frac{\partial T_{5'}}{\partial x}\right) = h_e (T_0 - T_{5'}) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T_{5'}^4) \quad (10)$$

Pour ces limites : $0 \leq x \leq 3 \text{ m}$

Limite 4

$$K_{air} \left(\frac{\partial T_4}{\partial y}\right) = 0 \quad (11)$$

Pour cette limite: $0 \leq y \leq 2,5 \text{ m}$

Limite sortie d'air et entrée d'air

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \text{ et } T_e = T_0 = 300 \text{ K} \quad (12)$$

Avec : $0 \leq x \leq 2,998 \text{ m}$

II-3-2. Equations de continuité, de transport de quantité de mouvement et conditions aux limites

Ces équations dérivent des équations de Navier-Stokes appliquées au sous domaine I et ces limites

➤ **Sous domaine I**

On a $u = (u, v)$ donc :

$$\frac{\partial \rho_{air}}{\partial t} + \rho_{air} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + u \frac{\partial \rho_{air}}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_{air}}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{air} \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_{air} u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_{air} v \frac{\partial u}{\partial y} = 2\eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left(\xi - \frac{2}{3}\eta \right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) + F_x \\ \rho_{air} \frac{\partial v}{\partial x} + \rho_{air} u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho_{air} v \frac{\partial v}{\partial y} = 2\eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \left(\xi - \frac{2}{3}\eta \right) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) + F_y \\ \text{avec } F_y = g(\rho_{air0} - \rho_{air}), F_x = \xi = 0 \text{ et } P = \text{cte et Avec } 0 \leq x \leq 3 \text{ m;} \\ 0 \leq y \leq 2,5 \text{ m pour le sous domaine I} \end{array} \right. \quad (14)$$

➤ **Limites du sous domaine I**

Limites 1, 2, 3, 4, 5, 3' et 5'

Où $\mathbf{u} = (u, v) = 0$ (15)

Limites entrée d'air

Où $\mathbf{u} = u_e = U_0 = 1 \text{ m/s}$ (16)

Limite sortie d'air

(17)

$$\frac{\partial \rho_{sair}}{\partial t} + u_s \frac{\partial \rho_{sair}}{\partial x} + v_s \frac{\partial \rho_{sair}}{\partial y} = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{sair} \frac{\partial u_s}{\partial t} + \rho_{sair} u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} + \rho_{sair} v_s \frac{\partial u_s}{\partial y} = 0 \\ \rho_{sair} \frac{\partial v_s}{\partial t} + \rho_{sair} u_s \frac{\partial v_s}{\partial x} + \rho_{sair} v_s \frac{\partial v_s}{\partial y} = g(\rho_{air0} - \rho_{sair}) \end{array} \right. \quad (18)$$

Avec $0 \leq x \leq 2,998 \text{ m}$ et $0 \leq y \leq 25 \text{ cm}$ pour cette limite

II-3-3. Conditions initiales

➤ **Conditions initiales du Sous domaine 2 (soleil)**

A $t = 0$ le sous domaine II est supposé à la température $T = T_0$ température externe.

➤ **Condition initiale du Sous domaine 1 (chambre de séchage)**

Dans ce sous domaine la condition initiale est la suivante : à $t = 0$ l'air est considéré à la température $T = T_0$

II-4. Résolution numérique

Le développement du système d'équations donne des équations différentielles partielles non linéaires en U , ρ et T ; résolues avec le logiciel Comsol Multiphysics 4.0 par la méthode des éléments finis (MEF).

Depuis 1969 la MEF est connue comme un outil général de résolution d'équations différentielles partielles (EDP), et est utilisée pour résoudre des problèmes non linéaires et non stationnaires dans plusieurs domaines. [8]

Les étapes d'application de la méthode des éléments finis sont les suivantes [9-12]:

- 1^{ère} étape : la réécriture des équations sous forme intégrale suivie d'une formulation faible pour inclure les conditions aux limites.
- 2^{ème} étape : la préparation des données géométriques qui consiste à discrétiser les domaines en éléments et calculer les connectivités de chacun ainsi que les coordonnées de ses nœuds.
- 3^{ème} étape : la construction des matrices élémentaires ; dans cette étape les variables de chaque élément sont approximées par de simples fonctions linéaires, polynomiales ou autres. Le degré du polynôme d'interpolation est relié au nombre de nœuds de l'élément. Notons que l'approximation nodale est appropriée.
- 4^{ème} étape : toutes les propriétés des éléments doivent être assemblées afin de former le système algébrique pour les valeurs nodales des variables physiques. C'est à ce niveau qu'on utilise les connectivités calculées à l'étape 2 pour construire les matrices globales à partir des matrices élémentaires.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les coefficients de transferts thermiques, de quantité de mouvement et les autres grandeurs physiques qui interviennent dans le modèle ont été pris à partir de la littérature. [13]. Les profils de température et de vitesse simulés de l'air de séchage au bout de 9h de simulation sont représentés par les **Figures 3 et 4**. Les **Figures 5 et 6** donnent également les évolutions des distributions spatiotemporelles de la température et du champ de vitesse dans le séchoir. Notons que 9h de simulation correspond à une journée d'ensoleillement de 8h à 17h.

La **Figure 3** présente deux phases ; la première croissante de t_0 à t_6 et la seconde décroissante de t_6 à t_9 . Cette allure est normale et peut s'expliquer par le fait qu'en début de journée les rayonnements solaires sont plus concentrés sur un seul capteur en l'occurrence celui dirigé vers le lever du soleil. Cela va donc minimiser les processus de transfert de chaleur au sein du séchoir. Au cours de son évolution passant par le zénith (entre t_4 et t_6), les rayonnements solaires atteignent les deux capteurs d'où une augmentation des processus de transfert de chaleur au sein du séchoir.

Ce fait a donc pour conséquence la valeur maximale de température atteinte à 14h (t_6 sur la **Figure 3**). A partir de 14h l'inclinaison du soleil vers l'ouest entraine une concentration du rayonnement au niveau du capteur dirigé vers le coucher du soleil ; d'où la décroissance observée pour la température à cause de la réduction des processus de transfert de chaleur au sein du séchoir. Ces résultats sont semblables à ceux de la littérature [14-17].

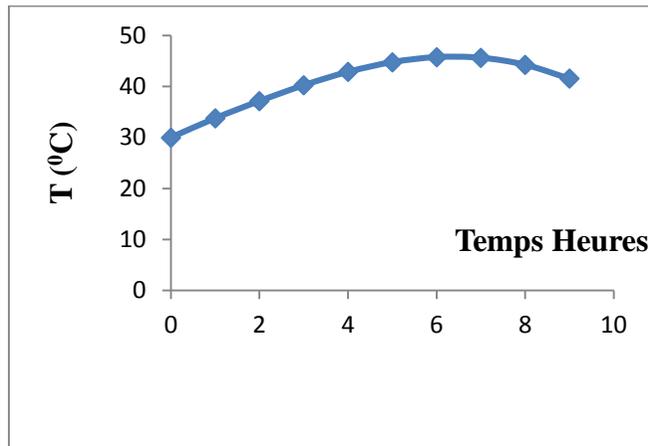


Figure 3 : Profil de Température moyenne simulée après 9h de fonctionnement du séchoir

Notons que 8h (heure GMT) est prise comme origine des temps. Concernant l'évolution de la vitesse (**Figure 4**), nous remarquons qu'elle comporte quatre phases. En effet, la première phase (croissante) part de t_0 (8h) à t_2 (10h du jour) ; la deuxième (décroissante) part de t_2 (10h du jour) à t_3 (11h du jour) puis la troisième (croissante) part de t_3 (11h du jour) à t_6 (14h) et enfin la quatrième (décroissante) qui part de t_6 (14h) à t_9 (17h). La première phase croissante peut s'expliquer par la mise en œuvre du processus de convection naturelle entrainant une augmentation de la vitesse de l'air. Ce processus est ralenti à partir de la deuxième phase d'où la décroissance observée.

Ce ralentissement s'explique par une insuffisance au niveau du réchauffement de l'air à cette période, freinant ainsi sa montée et favorisant sa descente ; d'où la chute de vitesse observée. Cela implique donc la reprise du processus de convection naturelle observée au niveau de la troisième phase caractérisé par une croissance. Ce processus est accentué jusqu'à t_6 (14h), heure à laquelle on observe la vitesse maximale. Enfin la quatrième phase décroissante peut s'expliquer par le ralentissement du processus de convection naturelle dû à une diminution de la température de l'air de séchage au niveau de cette phase.

Rappelons que les justifications susmentionnées sont basées sur la théorie de la convection naturelle. Cette évolution est également conforme à celle obtenue par Matallah AICHA [18] lors d'une étude comparative de séchage solaire des arachides par trois modes différents.

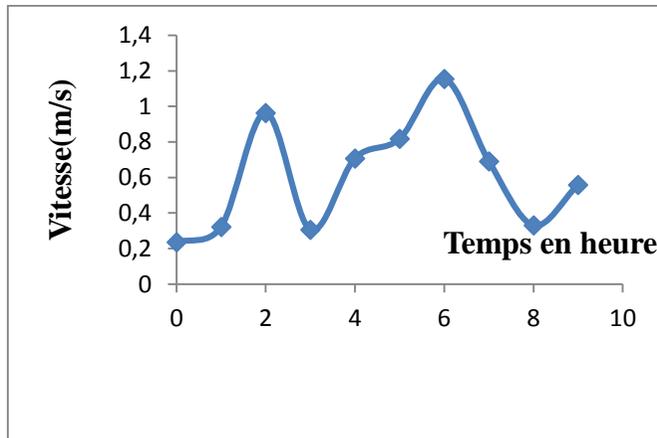


Figure 4 : Profil de vitesse simulée après 9h de fonctionnement du séchoir

Par ailleurs, la distribution spatiotemporelle de la température (**Figure 5**) a été réalisée. Cette **Figure 5** montre que les zones les plus chaudes sont en hauteur et pratiquement au centre du séchoir. La forme spatiale de cette distribution est logique car ces zones sont plus proches des capteurs. Aussi, l'analyse de la **Figure 6** montre que les champs de vitesse les plus élevés sont étalés pratiquement au centre du séchoir. Cela peut être expliqué par le fait que le centre constitue l'une des zones les plus chaudes donc favorisant l'effet de serre. Ces résultats relatifs à la distribution de température et de champs de vitesse au niveau du séchoir, montrent que les positions convenables à l'exposition des claies de séchage sont situées au centre du séchoir car c'est là qu'on a les plus grandes vitesses et les températures convenables au séchage d'un produit.

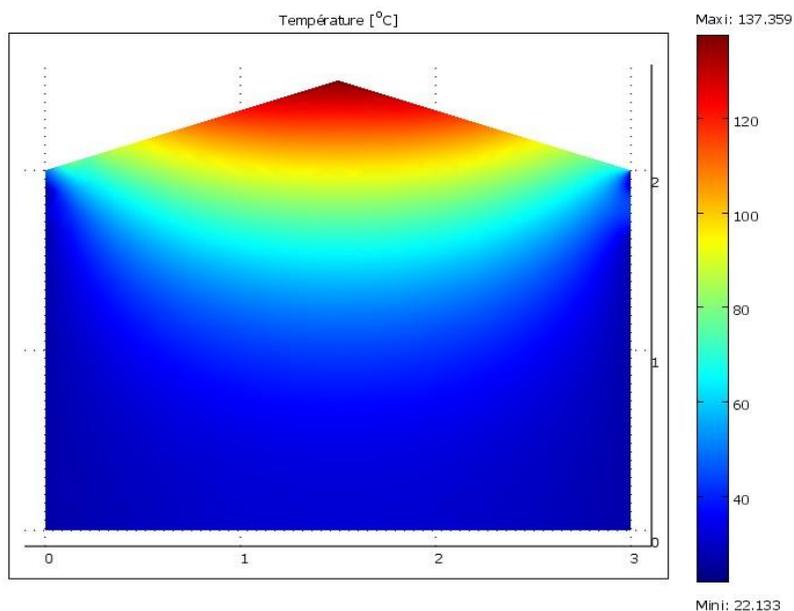


Figure 5 : *Distribution spatiotemporelle de la température au sein du séchoir à $t = 9h$ de fonctionnement*

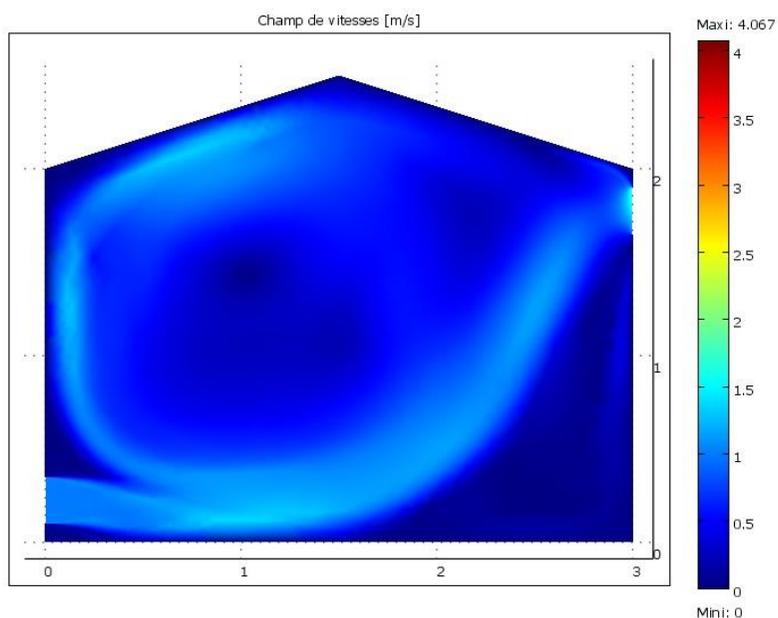


Figure 6 : *Distribution spatiotemporelle du champ de vitesse au sein du séchoir à $t = 9h$ de fonctionnement*

IV - CONCLUSION

Le modèle proposé a l'avantage de pouvoir s'appliquer à n'importe quel système de séchage solaire type serre, avec utilisation d'autres matériaux pour les capteurs, tels que les plastiques transparents. Ces résultats sont intéressants car ils prouvent que l'on peut toujours optimiser une installation de séchage solaire et montre que les zones les plus fluides et énergétiques sont obtenues en hauteur et pratiquement au centre du séchoir. Ces résultats sont d'une importance capitale et peuvent trouver un large domaine d'application, principalement dans l'agriculture où la période des grandes pluies constitue une contrainte majeure à la conservation des produits dû aux averses.

RÉFÉRENCES

- [1] - KIBANGOU-NKEMBO. S. A., « Contribution à l'étude du séchage solaire de la banane plantain, de la mangue et du manioc : essais de désorption, sorption et modélisation ». Thèse de doctorat, soutenue le 20/12/2013 à l'Université FHB de Cocody-Abidjan.
- [2] - Siaka TOURE and Serge KIBANGOU-NKEMBO., A numerical model and experimental study of natural solar drying of cassava in Abidjan. In "World Renewable Energy Congress VI (WREC2000) proceedings pp. 21552158".
- [3] - Siaka TOURE and Serge KIBANGOU-NKEMBO., Comparative study of natural solar drying of cassava, banana and mango. In "Renewable Energy, 29 (2004) 975 – 990".
- [4] - Warda Belachi., Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaire. Mémoire de magister, soutenue le 15/02/2009 à L'Université Kasdi Merbah Ouargla, Département de physique.
- [5] - Busunia MA., Abc T. Characteristics of rough rice under natural convection. Journal of Food Engineering, 47, 295-301, 2001.
- [6] - Michael W. Bassey et O.G. Schmidt, le séchage solaire en Afrique, Compte rendu du colloque tenu à Dakar, Sénégal, du 21 au 24 juillet 1986.
- [7] - Akmel Clément., Séchage Solaire des fèves de cacao : étude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage. Thèse de doctorat, soutenue le 22/07/2010 à L'Université d'Abobo-Adjamé Abidjan.
- [8] - Abdelghani SEGHIR., Département de Génie Civil, Université A. Mira de Béjaia en Algérie □ Cours : Méthode des éléments finis chapitre 2.

- [9] - O. C. Zienkiewicz and R. E. Newton. Coupled vibrations of a structure submerged in a compressible fluid. In Int. Sym. Finite Element Techniques, 1st-15th May 1969.
- [10] - O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu. Finite Element Method – Its Basis and Fundamentals. Elsevier, 2005.
- [11] - S. Mitra and K.P. Sinhamahapatra. 2D simulation of fluid-structure interaction using finite element method. Finite Elem. Anal. Des., 45:52-59, 2008.
- [12] - G.R. Liu and S.S. Quek jerry. A non-reflecting boundary for analyzing wave propagation using the finite element method. Finite Elem. Anal. Des., 39 :403-417, 2003.
- [13] - F.P. Incropera and D.P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [14] - R.Benkhefella, S.El Mokretar, R.Miri et M.Belhamel, Séchage des produits agro-alimentaires dans un séchoir solaire direct. Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.
- [15] - J.NGANHOU, TNGANYA, Simulation numérique du comportement dynamique d'un système de séchage solaire de fèves de Cacao au Cameroun ; doc. Extrait du PBA 1 / article 40-2003.
- [16] - H.Hallak, J.Hilal, F.Hilal et R.Rahhal, The staircase solar dryer : design and characteristics ;1996 Elsevier science Ltd.
- [17] - NADIA CHALAL, Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect ; mémoire de Magister Université Mentouri – Constantine d'Algérie, 16 décembre 2007.
- [18] - Matallah AICHA, Séchage solaire des arachides par trois modes différents : Etude comparatif et aspect qualité ; Mémoire de master Université Kasdi Marbah Ouargla d'Algérie, 16 juin 2013.