

## **Simulation numérique d'un séchage solaire sous serre à air convectif naturel : Application au séchage de fèves de cacao**

### **[ Numerical simulation of a greenhouse solar drying at natural convective air : Application to drying cocoa beans ]**

*Karidioula Daouda<sup>1</sup>, Koné Kisselmina Youssouf<sup>2</sup>, Akmel Djedjro Clement<sup>3</sup>, Assidjo Nogbou Emmanuel<sup>3</sup>, Trokourey Albert<sup>2</sup>,  
and Laguerre Jean-Claude<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>UFR Sciences et Technologies, Laboratoire de chimie, Université de Man, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>UFR SSMT, Laboratoire de chimie - physique, Université Félix Houphouët Boigny (UFHB) de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup>UMRI Sciences des Procédés Alimentaires Chimiques et Environnementaux, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

<sup>4</sup>Département des Sciences et Technologie Agro-Industriel, Institut Polytechnique UniLaSalle Beauvais, 19 Rue Pierre Waguet 60026, Beauvais, France

---

Copyright © 2020 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The aim of this study is to compare a greenhouse solar drying simulated by a developed numerical model, with the actual experimental drying of cocoa beans. Thus, using multiphysical models (based on conservation laws of energy, mass and momentum within the dryer and beans), it was possible to simulate the greenhouse drying behavior of the beans. The resolution of the developed equation system was done using the finite element method of COMSOL Multiphysics 4.0 software. For the validation of the numerical model, an experimental study has been developed at the designed dryer. In this study, a drying operation of cocoa beans was conducted. The characteristics of the drying air (temperature, relative humidity and speed) as well as the mass of the beans were regularly determined over time. The results indicate that, in general, there is good agreement between the experimental results and the simulated results (R close to unity). This allows a validation of the mathematical model of the drying of cocoa beans within the greenhouse type solar dryer used.

**KEYWORDS:** Modeling, simulation, greenhouse dryer, cocoa beans, energy balance, material balance.

**RÉSUMÉ:** L'objectif de cette étude est de comparer un séchage solaire sous serre simulé par un modèle numérique développé, avec le séchage expérimental réel des fèves de cacao. Ainsi, à l'aide de modèles multiphysiques (basé sur les lois de conservation d'énergie, de masse et de quantité de mouvement au sein du séchoir), il a été possible de simuler le comportement au séchage sous serre des fèves. La résolution du système d'équations développé s'est faite par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics 4.0. Pour la validation du modèle numérique, une étude expérimentale a été élaborée au niveau du séchoir conçu. Dans cette étude, une opération de séchage de fèves de cacao a été menée. Les caractéristiques de l'air de séchage (température, humidité relative et vitesse) ainsi que de la masse des fèves ont été régulièrement déterminées au cours du temps. Les résultats indiquent qu'en général, il existe une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés (R proche de l'unité). Ce qui permet une validation du modèle mathématique du séchage de fèves de cacao au sein du séchoir solaire type serre.

**MOTS-CLEFS:** Modélisation, simulation, séchoir serre, fèves de cacao, bilan énergétique, bilan matière.

## NOMENCLATURE

- $\rho$  : Masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $C_p$  : Capacité calorifique à pression constante J/ ( $\text{kg}\cdot\text{K}$ )  
C : Concentration en eau du produit ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )  
k : Conductivité thermique W/( $\text{m}\cdot\text{K}$ )  
kc : Coefficient de transfert de masse ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
q : Source de chaleur ou densité volumique d'énergie générée ( $\text{w}/\text{m}^3$ )  
g : Constante de pesanteur ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )  
 $\varepsilon$  : Coefficient d'émission  
G : Irradiation en provenance d'une surface ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
I<sub>da</sub> : Chaleur latente de vaporisation d'eau à 100 OC ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )  
D : Coefficient de diffusion d'eau du produit ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )  
D<sub>m</sub> : Viscosité cinématique de l'eau au sein du produit ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $\sigma$  : Constante de Stefan ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ )  
h<sub>e</sub> : coefficient de transfert de chaleur de l'air extérieur ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}$ )  
 $\eta$  : viscosité dynamique (Pa.s)  
 $\xi$  : viscosité élongationnelle (Pa.s)  
T : Température (K)  
x : Variable d'espace dans la direction horizontal (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)  
 $\eta$  : viscosité dynamique du fluide (air) (Pa.s)

## INDICES

- lamp : lampe  
b : surface du produit  
T : produit  
air : air  
s : sortie  
e : entrée  
amb : ambiant  
O : initiale

## 1 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]. Le séchage par air chaud forcé (électrique), reste un procédé très onéreux et non utilisable dans les secteurs ruraux des pays en développement. Le développement des énergies renouvelables et tout particulièrement l'énergie solaire, a été sérieusement envisagé car il est une solution qui intègre les différentes problématiques liées au séchage, à savoir une économie d'énergie, une réponse à la dispersion géographique des lieux de séchage et une simplicité des techniques mises en œuvre [5]. Cette technique est une alternative raisonnable, en particulier dans les pays en développement où le degré d'ensoleillement est élevé tout au long de l'année et où l'utilisation des méthodes traditionnelles continue de s'imposer.

Le paysan pratique le séchage au soleil en étalant les produits agricoles parfois à même le sol, sur des aires en ciment, sur des claies en natte. Ceux-ci sont ainsi exposés aux intempéries, à la poussière, aux insectes et aux germes de toutes sortes. Ces méthodes pourraient entraîner non seulement la pollution des produits séchés, mais aussi la photo-oxydation des vitamines photosensibles et de composés phénoliques notamment pour les plantes aromatiques. Certains pratiquent le séchage au grenier à l'aide de la fumée générée par la combustion du bois ou de déchets variés. Si ce type de séchage conduit à un produit fini de teneur en eau suffisamment basse, il pose en revanche un problème de qualité dû à une forte teneur en acide acétique

et à un goût de fumée notamment dans le cas de certains produits tels que le cacao [6]. On enregistre ainsi une perte considérable non seulement au niveau de la quantité, mais aussi au niveau de la qualité du produit séché. L'amélioration rationnelle de toutes ces techniques passe par la mise en place de séchoirs solaires.

Dans le but d'utiliser efficacement ce type de séchoir sous serre et de prédire son comportement selon les conditions climatiques locales, qu'il a été envisagé cette étude. Elle a pour objectif de réaliser une simulation numérique du procédé de séchage solaire sous serre en convection naturelle, puis de valider le modèle de simulation développé par une application sur le séchage de fèves de cacao.

## 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1 SÉCHOIR SOLAIRE SERRE

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 verre 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).

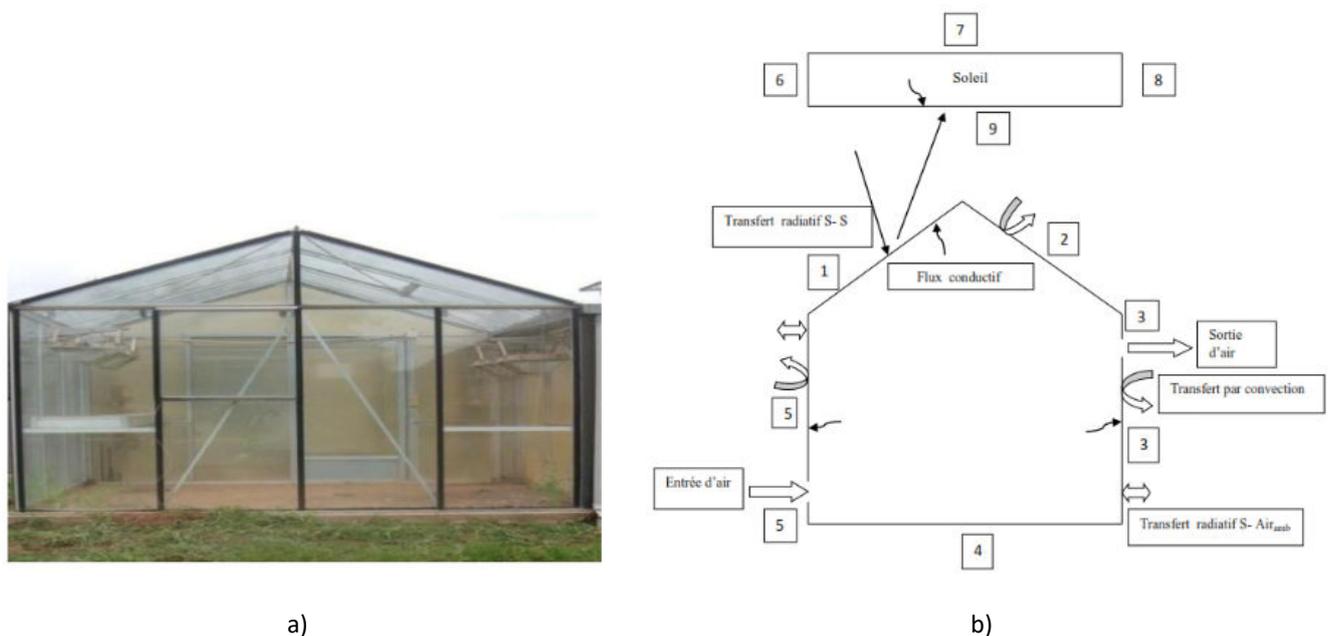


Fig. 1. a) Séchoir solaire serre expérimental ; b) Description du système à modéliser : éléments et mécanismes à prendre en compte dans un modèle de séchoir solaire

### 2.2 PRÉPARATION DES FÈVES DE CACAO

Les fèves de cacao utilisées ont été achetées dans le village de Toubokro (à proximité de Yamoussoukro) pour la partie expérimentale. Elles avaient déjà subi une fermentation de 7 jours. C'est donc le premier jour de séchage, en vue de l'arrêt de cette fermentation, que la serre solaire a été utilisée. Les fèves ont été étalées sur une étagère comme présenté à la figure 2 avec la description des différents échanges qui ont lieu au niveau du produit.

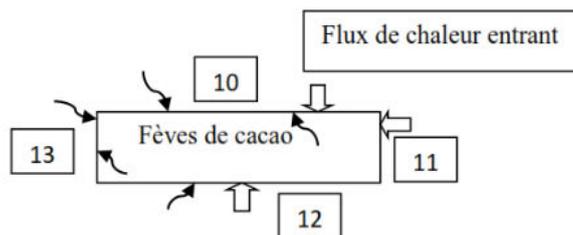


Fig. 2. Disposition des fèves de cacao sur l'étagère avec les différents échanges qui ont lieu au niveau du produit

### 2.3 MODÉLISATION DU SÉCHAGE SOLAIRE SOUS SERRE

Le modèle mathématique des transferts de chaleur, du mouvement du fluide au sein du séchoir et de la diffusion d'eau au niveau du produit a été développé à partir des bilans énergétiques, de quantités de mouvement de l'air et de diffusion d'eau. Ces bilans traduisent la conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et de la masse. 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 le développement des modèles du séchoir solaire et des transferts thermiques au sein du produit le plus simplement possible. 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].

#### 2.3.1 MODÈLES DE CONSERVATION D'ÉNERGIE DU SÉCHOIR À VIDE

Les équations de ces modèles ont été obtenues en appliquant la loi de conservation d'énergie au niveau du sous domaines I (chambre de séchage) et du sous domaine II (soleil) couplées à leurs différentes conditions aux limites.

Ainsi pour le sous domaine I, les équations (1) à (9) ont été développées.

- **Le bilan énergétique dans la chambre de séchage (sous domaine I) est donné par l'équation 1:**

$$\rho_{air} C_{p_{air}} \frac{\partial T_I}{\partial t} - k_{air} \left( \frac{\partial^2 T_I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_I}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (1)$$

Avec  $0 \leq x \leq 3 \text{ m}$  ;  $0 \leq y \leq 2,5 \text{ m}$  pour ce sous domaine ;  $T_I$  : température du sous domaine I ( $^{\circ}\text{C}$ )

- **Les conditions aux limites du séchoir à vide (domaine I)**

Pour la chambre de séchage (sous domaine I), trois types de limites sont présenté par rapport à sa symétrie. D'abord les limites 1 et 2 qui délimite le transfert de chaleur au niveau de la toiture en verre de la serre et mise en exergue par les conditions aux limites représentées par les Eq. 2 et 3.

Limites 1 et 2 :

$$-k_{air} \cos\theta \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + k_{air} \sin\theta \left( \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) = h_e (T_0 - T_1) + \varepsilon (G - \sigma T_1^4) \quad (2)$$

$$k_{air} \cos\theta \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + k_{air} \sin\theta \left( \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) = h_e (T_0 - T_2) + \varepsilon (G - \sigma T_2^4) \quad (3)$$

Avec  $T_0$  : la température initiale de la toiture de la serre ;  $T_1$  et  $T_2$  : températures externes des côtés respectifs gauche et droit de la toiture en verre du sous domaine I (°C) (figure 1); les autres paramètres sont précisés dans la nomenclature.

Pour ces limites, du fait de l'inclinaison d'un angle  $\beta$ , on a :  $0 \leq y \leq 0,5$  m et  $0 \leq x \leq 3$  m et  $\beta = \pi/10$

Ensuite, sur les faces d'entrée et de sortie de la serre, on a des ouvertures basse (pour l'entrée de l'air) et haute (sortie de l'air), qui permettent de distinguer deux limites : 3, 3' et 5, 5'. Ainsi pour le côté entrée et sortie de l'air de la chambre de séchage (sous domaine I) les conditions aux limites sont exprimées à travers les équations 4 à 7.

Limite 3, 3', 5 et 5' :

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

$$-K_{air} \left( \frac{\partial T_5}{\partial x} \right) = h_e (T_0 - T_5) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T_5^4) \quad (5)$$

$$-K_{air} \left( \frac{\partial T_{3'}}{\partial x} \right) = h_e (T_0 - T_{3'}) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T_{3'}^4) \quad (6)$$

$$-K_{air} \left( \frac{\partial T_{5'}}{\partial x} \right) = h_e (T_0 - T_{5'}) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T_{5'}^4) \quad (7)$$

Avec  $T_3, T_{3'}, T_5$  et  $T_{5'}$  : les températures externes des côtés 3, 3', 5 et 5' sur la figure 1 (°C) ; les autres paramètres sont précisés dans la nomenclature. Pour ces limites, on a :  $0 \leq x \leq 3$  m

Enfin pour le sol sur lequel est posé la serre, on a la limite 4, où il n'existe pas de transfert de chaleur dû à l'air extérieur de séchage. Cette condition aux limites est exprimée par l'équation 8.

Limite 4 :

$$K_{air} \left( \frac{\partial T_4}{\partial y} \right) = 0 \quad (8)$$

Avec  $T_4$  : température externe du côté 4 sur la figure 1 (°C) ; les autres paramètres sont précisés dans la nomenclature. Pour cette limite, on a :  $0 \leq y \leq 2,5$  m.

Concernant les ouvertures sur les faces 3 et 5 du sous domaine I, la condition aux limites est présentée dans l'équation 9.

Limite sortie d'air et entrée d'air :

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \text{ et } T_e = T_0 \quad (9)$$

Pour la limite sortie, on a :  $0 \leq x \leq 0,002$  m ;  $T_s$  : température de sortie de l'air et  $T_e$  : température d'entrée de l'air.

### 2.3.2 MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Dans cette étude, le soleil a été représenté par le sous domaine II. Ainsi en appliquant la loi de conservation d'énergie au niveau de ce sous domaine avec leurs conditions aux limites, l'on obtient les équations 10 et 11.

- **Le bilan énergétique du rayonnement solaire (sous domaine II) est donné par l'équation 10:**

$$\rho_{lamp} c_{p_{lamp}} \frac{\partial T_{II}}{\partial t} - k_{lamp} \left( \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial y^2} \right) = q_{lamp} \quad (10)$$

Avec  $0 \leq y \leq e_{lamp} = 0,5$  m et  $0 \leq x \leq 3$  m pour le sous domaine II.  $T_{II}$  : température du sous domaine II (°C)

- **Les conditions aux limites du sous domaine II (soleil)**

Le sous domaine II représentant le soleil (figure 1), fait distinguer deux types de conditions aux limites : celle du côté 9 (ou limite 9), située juste en dessous de la serre de séchage, est responsable du rayonnement solaire direct selon l'équation 11 ; et celle des côtés 6, 7 et 8 dont le rayonnement n'est pas direct sur le séchoir (Eq. 12).

Limite 9 :

$$-k_{lamp} \left( \frac{\partial T_9}{\partial y} \right) = \varepsilon (G - \sigma T_9^4) \quad (11)$$

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

Ainsi, pour les limites 6, 7 et 8 où la condition aux limites est égale à la température initiale.

Limite 6,7 et 8 :

$$T = T_0 \quad (12)$$

### 2.3.3 MODÈLES DE CONSERVATION D'ÉNERGIE DU SÉCHOIR CHARGÉ DES FÈVES DE CACAO

Concernant le séchoir chargé, les équations déterminées ci-dessus pour les domaines I et II restent valables. A ces équations, viennent s'ajouter celles liées au sous domaine III. Et le sous domaine III est représenté uniquement par les fèves de cacao. Par application de la loi de conservation d'énergie à ce sous domaine III, on obtient les équations 13 à 17).

- **Le bilan énergétique dans la chambre de séchage chargée (sous domaine III) est donné par l'équation 13:**

$$\rho_T C_{pT} \frac{\partial T_{III}}{\partial t} - k_T \left( \frac{\partial^2 T_{III}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{III}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (13)$$

Avec  $0 \leq x \leq 3$  m ;  $0 \leq y \leq 2,5$  m, pour ce sous domaine ;  $T_{III}$  : température du sous domaine III (°C)

- **Les conditions aux limites du séchoir chargé de fèves**

Le domaine III, représenté par les fèves de cacao qui chargent la chambre de séchage (domaine I), comprend 4 types de limites (10,11,12 et 13) en supposant que les fèves ont une forme rectangulaire en 2D (figure 2). Lesquelles limites génèrent des conditions aux limites présentées par les équations 14 à 17.

Limite 10:

$$k_{air} \left( \frac{\partial T_{10}}{\partial y} \right) - k_T \left( \frac{\partial T_{10}}{\partial y} \right) = D_m \cdot l_{da} \cdot c_{10} \quad (14)$$

Limite 11:

$$k_T \left( \frac{\partial T_{11}}{\partial x} \right) - k_{air} \left( \frac{\partial T_{11}}{\partial x} \right) = D_m \cdot l_{da} \cdot c_{11} \quad (16)$$

Limite 12:

$$k_T \left( \frac{\partial T_{12}}{\partial y} \right) - k_{air} \left( \frac{\partial T_{12}}{\partial y} \right) = D_m \cdot l_{da} \cdot c_{12} \quad (15)$$

Limite 13:

$$K_{air} \left( \frac{\partial T_{13}}{\partial x} \right) - K_T \left( \frac{\partial T_{13}}{\partial x} \right) = D_m \cdot l_{da} \cdot c_{13} \quad (17)$$

### 2.3.4 MODÈLES DE CONTINUITÉ ET DE TRANSPORT DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT

Les équations de ces modèles ont été obtenues en appliquant la loi de continuité et de conservation de la quantité de mouvement au niveau du sous domaines I (chambre de séchage) et du sous domaine II (soleil) couplées à leurs différentes conditions aux limites. Ainsi pour le sous domaine I, les équations 18 et 19 ont été développées.

- Le bilan de continuité et conservation de la quantité de mouvement dans le domaine I est donné par l'équation 18 et 19:

On a  $\mathbf{u} = (u, v)$  donc :

$$\frac{\partial \rho_{air}}{\partial t} + \rho_{air} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial \rho_{air}}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_{air}}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{air} \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_{air} u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_{air} v \frac{\partial u}{\partial y} = 2\eta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left( \xi - \frac{2}{3}\eta \right) \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) + F_x \\ \rho_{air} \frac{\partial v}{\partial x} + \rho_{air} u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho_{air} v \frac{\partial v}{\partial y} = 2\eta \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \left( \xi - \frac{2}{3}\eta \right) \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right) + F_y \end{array} \right. \quad (19)$$

Avec :  $F_y = g(\rho_{air0} - \rho_{air})$ ,  $F_x = \xi = 0$  et  $P = cte$  et Avec  $0 \leq x \leq 3$  m ;  $0 \leq y \leq 2,5$  m pour le sous domaine I.

- Les conditions aux limites du séchoir à vide (domaine I)

Ici, les limites de la chambre de séchage sont composées des côtés 1, 2, 3, 3', 4, 5, 5' du sous domaine I, qui ont pour conditions aux limites l'expression mathématique suivante (Eq. 20). Pour ce qui est de l'entrée et de la sortie de l'air dans le sous domaine I, les conditions aux limites sont mises en exergue dans les équations 21 et 22.

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

$$\text{On a } \mathbf{u} = (u, v) = 0 \quad (20)$$

Limite entrée d'air

$$\text{On a } \mathbf{u} = u_e = \mathbf{U}_0 \quad (21)$$

Limite sortie d'air

$$\frac{\partial \rho_{sair}}{\partial t} + \rho_{sair} \left( \frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial v_s}{\partial y} \right) + u_s \frac{\partial \rho_{sair}}{\partial x} + v_s \frac{\partial \rho_{sair}}{\partial y} = 0 \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{sair} \frac{\partial u_s}{\partial t} + \rho_{sair} u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} + \rho_{sair} v_s \frac{\partial u_s}{\partial y} = 0 \\ \rho_{sair} \frac{\partial v_s}{\partial t} + \rho_{sair} u_s \frac{\partial v_s}{\partial x} + \rho_{sair} v_s \frac{\partial v_s}{\partial y} = g(\rho_{air0} - \rho_{sair}) \end{array} \right. \quad (23)$$

Avec  $0 \leq x \leq 0,002$  m et  $0 \leq y \leq 25$  cm pour cette limite

### 2.3.5 MODÈLES DE DIFFUSIVITÉ DE L'EAU DU PRODUIT

Les équations de ces modèles ont été obtenues en appliquant la loi de conservation de la masse au niveau du sous domaines III couplées à leurs différentes conditions aux limites. Ainsi pour le sous domaine III, les équations 24 à 28 ont été obtenues.

- Le bilan de matière dans le domaine III est donné par l'équation 18 et 19:

$$\frac{\partial c_{III}}{\partial t} - D \left( \frac{\partial^2 c_{III}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_{III}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (24)$$

Avec  $0 \leq x \leq 3$  m ;  $0 \leq y \leq 2,5$  m, pour ce sous domaine ;  $c_{III}$  : concentration en eau du sous domaine III (°C)

- Les conditions aux limites du séchoir chargé de fèves

Ici le domaine III, comprend 4 types de limites (10,11,12 et 13) en supposant que les fèves ont une forme rectangulaire en 2D (figure 2). Lesquelles limites génèrent des conditions aux limites présentées par les équations 25 à 28.

Limite 10:

$$D \left( \frac{\partial c_{10}}{\partial y} \right) = k_c (c_b - c_{10}) \quad (25)$$

Limite 11:

$$D \left( \frac{\partial c_{11}}{\partial x} \right) = k_c (c_b - c_{11}) \quad (26)$$

Limite 12:

$$-D \left( \frac{\partial c_{12}}{\partial y} \right) = k_c (c_b - c_{12}) \quad (27)$$

Limite 13

$$-D \left( \frac{\partial c_{13}}{\partial x} \right) = k_c (c_b - c_{13}) \quad (28)$$

Avec  $0 \leq y \leq 0,026$  m ;  $0 \leq x \leq 1$  m et  $C_b = 0,02 \times \sigma_1$ , pour le sous domaine III et ses limites ;  $\sigma_1$  : la masse volumique du produit.

La concentration étant liée à la teneur en eau, l'équation 24 peut s'écrire :

$$\frac{\partial X}{\partial t} - D \left( \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (29)$$

$$\text{Avec } X = \frac{m}{m_i} (X_i + 100) - 100 \text{ et } X_i = 100 \left( \frac{m_i}{m_s} - 1 \right)$$

Il en est de même pour les équations 25 ; 26 ; 27 et 28.

Avec :  $m_i$  : masse du produit à l'instant initial (kg);  $m_s$  : masse anhydre du produit (kg);  $m$  : masse du produit à l'instant t (kg);  $X_i$  : teneur en eau du produit en base sèche à l'instant initial (% kg eau / kg ms);  $X$  : teneur en eau du produit en base sèche à l'instant t (% kg eau / kg ms).

### 2.3.6 CONDITIONS INITIALES

Les conditions aux limites sont présentées pour chaque domaine comme suit :

- **Condition initiale du Sous domaine I (chambre de séchage)**

Dans ce sous domaine la condition initiale est la suivante : à  $t=0$ , l'air est considéré à la température  $T=T_0$ , avec une masse volumique  $\rho = \rho_{\text{air}0}$  : masse volumique initiale de l'air et à la vitesse  $U = 0$ .

- **Conditions initiales du Sous domaine II (soleil)**

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

- **Conditions initiales du Sous domaine III (Produit)**

A  $t = 0$  le sous domaine III est supposé à la température  $T=T_{00}$  température initiale du produit et  $X= X_i =X_0$  teneur en eau initial du produit.

## 2.4 RÉSOLUTION NUMÉRIQUE

Le développement du système d'équations donne des équations différentielles partielles non linéaires en  $T$ ,  $U$ ,  $\rho$  et  $X$  ; 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<sup>ère</sup> étape : la réécriture des équations sous forme intégrale suivie d'une formulation faible pour inclure les conditions aux limites.
- 2<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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.

## 2.5 ETUDE EXPÉRIMENTALE

### 2.5.1 RÉALISATION DU SÉCHAGE DES FÈVES DE CACAO

Trois (3) essais de séchage sous serre de fèves de cacao ont été réalisés dont un essai correspond à six (6) jours de séchage et un jour correspond à neuf (9) heures de séchage de 8h à 17h. La charge moyenne des fèves par unité de surface a été de 20 kg.m<sup>-2</sup>. Cependant pour faciliter la pesée, les fèves ont été regroupées par quantité de 0,226 kg sur une surface délimitée par des nacelles de 113 cm<sup>2</sup>. Le processus de séchage a été suivi par la mesure de certains paramètres de l'air de séchage (température ; humidité relative et vitesse) et du produit (teneur en eau du produit en base sèche X).

### 2.5.2 DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES EXPÉRIMENTAUX (TEMPÉRATURE, HUMIDITÉ RELATIVE ET VITESSE DE L'AIR)

Les températures ont été mesurées par un psychromètre à deux thermomètres gradués au 1/10 (Coffret J. TONNELOT, France); les humidités relatives à l'aide d'un diagramme de l'air humide (Diagramme de Mollier) et les vitesses de l'air à l'aide d'un anémomètre à fil chaud à sonde discrète portable (Testo 425, France). L'erreur absolue sur les mesures faites a été de 0,01 m/s.

### 2.5.3 DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU

Pour la détermination des courbes de perte d'humidité  $X$ , des pesées de la masse  $m$  ont été effectuées, chaque heure, durant toute l'opération de l'essai de séchage jusqu'à la stabilisation du produit ; ce qui correspond en général à une teneur en eau des fèves environ de 8 % (kg eau/kg ms). [6] L'humidité initiale  $X_0$  est déduite à la fin de l'opération de séchage après détermination de la masse anhydre du produit final. Les pesées ont été effectuées grâce à une balance électronique de marque

SARTORIUS BL 1500 (précision 1g). La teneur en eau  $X_i$  à l'instant,  $t$  (kg eau/ kg de Ms) des essais expérimentaux a été déterminée comme suit (équation 30) :

$$X_i = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (30)$$

Avec  $m_t$  : la masse du produit à l'instant,  $t$  (g);  $m_s$  : la matière sèche du produit (g)

### 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 DISTRIBUTION SPATIOTEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA VITESSE DE L'AIR

Les résultats de simulation de la température au sein de la chambre de séchage (domaine I) sont présentés par les figures 4 et 5.

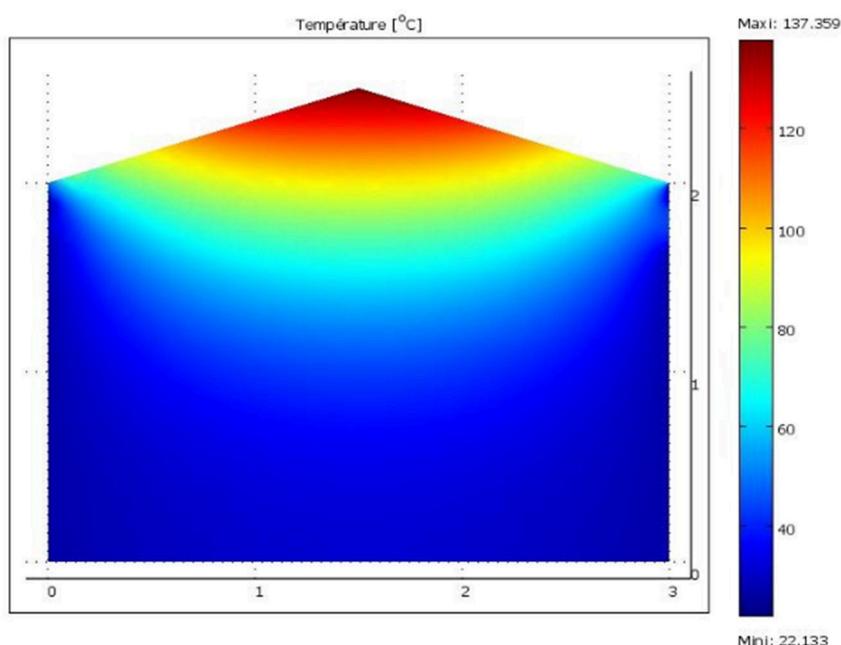
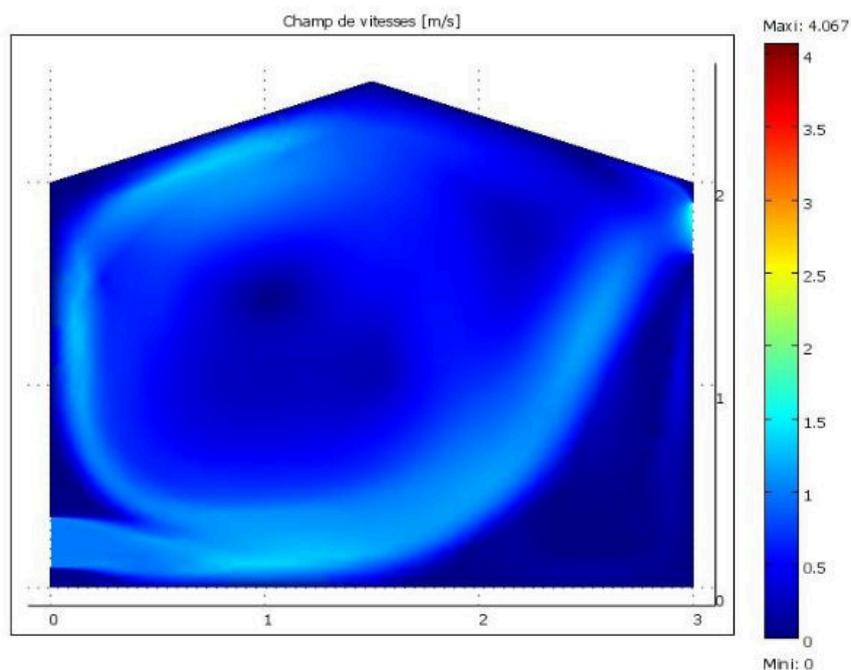


Fig. 3. Distribution spatiotemporelle de la température au sein du séchoir à  $t = 9h$  de fonctionnement



**Fig. 4.** Distribution spatiotemporelle du champ de vitesse au sein du séchoir à  $t = 9h$  de fonctionnement

La Figure 4 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 5 montre que les champs de vitesse les plus élevés sont étalés également en hauteur et au centre du séchoir. Cela peut être expliqué par le fait que ces régions constituent les zones les plus chaudes donc favorisant la convection naturelle. 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 grands couples de valeurs : vitesse moyenne ( $V_{moyenne} = 0,58 \text{ m.s}^{-1}$ ) et température ( $T_{moyenne} = 50,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) convenables au séchage des produits agricoles tels que le cacao. Une étude expérimentale de séchage de fèves a été menée à cette position durant six (6) jours, l'évolution des paramètres caractéristiques de l'air de séchage et la teneur en eau des fèves au cours du temps ont été confrontés.

### 3.2 CARACTÉRISTIQUES LIÉS À L'AIR DE SÉCHAGE

Les résultats de l'étude comparative entre les données simulées au niveau des caractéristiques de l'air de séchage et les données expérimentales sont présentés aux figures 6, 7 et 8. Ils présentent respectivement l'évolution de la température, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air de séchage en fonction du temps.

- Températures de l'air

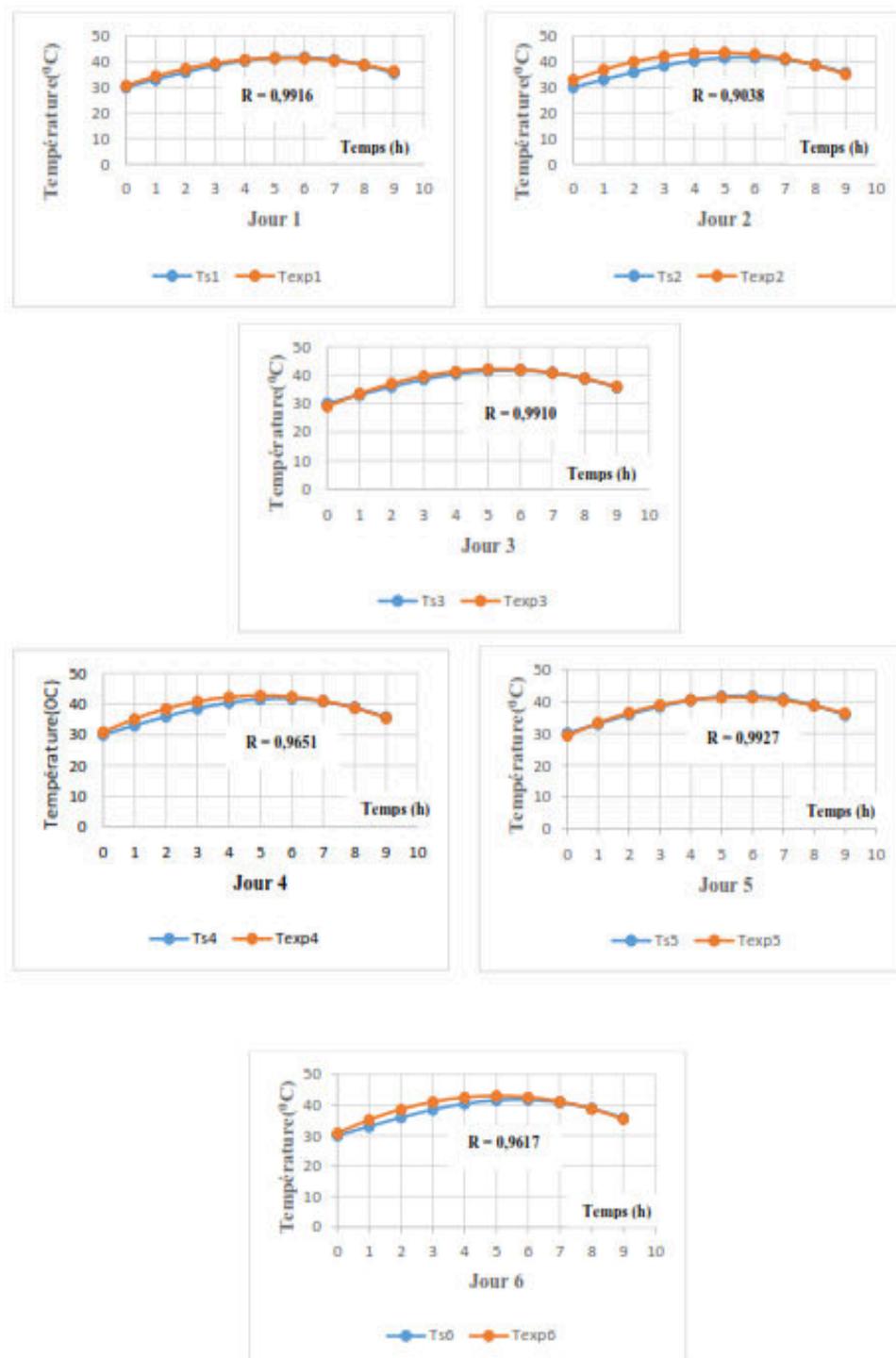


Fig. 5. Comparaison des températures simulée et expérimentale dans la serre de séchage solaire

L'analyse de la figure 6, montre que du premier jour de séchage au 6<sup>e</sup> jour de séchage, la température simulée par le logiciel COMSOL, est globalement en concordance avec les données des tests réalisés en réel. Les coefficients de corrélation R obtenus au cours des 6 jours d'essai de séchage entre les valeurs simulées et expérimentales de la température de l'air de séchage varient entre 0,9616 et 0,9927. Cela signifie que les valeurs de températures simulées prédisent très bien celles des

températures expérimentales. Ces résultats sont en conformité avec ceux sur la simulation numérique du comportement dynamique d'un système de séchage solaire de fèves de cacao au Cameroun [6].

- Humidité relative de l'air

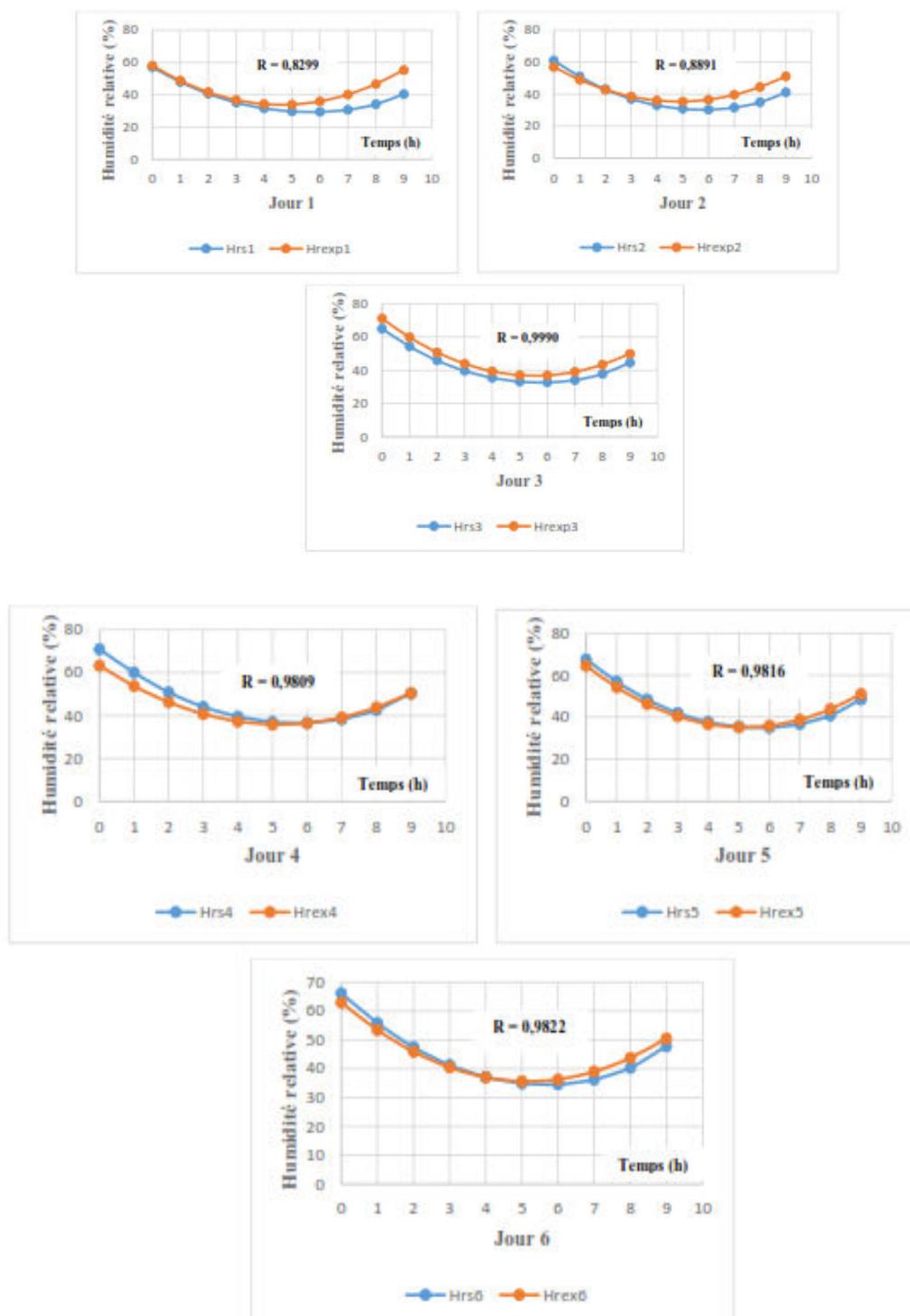


Fig. 6. Comparaison des humidités relatives simulée et expérimentale dans la serre de séchage solaire

A l'observation de la figure 7, on note que du 1<sup>er</sup> au 6<sup>e</sup> jour de séchage, les valeurs de l'humidité relative simulée par le logiciel COMSOL, sont globalement en concordance avec celles des tests réalisés expérimentalement. En effet, les coefficients

de corrélation R obtenus au cours des 6 jours d'essai de séchage entre les valeurs simulées et expérimentales de l'humidité relative de l'air de séchage varient entre 0,8299 et 0,9990. Cela signifie que les valeurs des humidités relatives simulées prédisent très bien celles des températures expérimentales à près de 99%. Ces résultats sont en conformité avec ceux sur la simulation numérique du comportement dynamique d'un système de séchage solaire de fèves de cacao au Cameroun [6].

- Vitesse de l'air

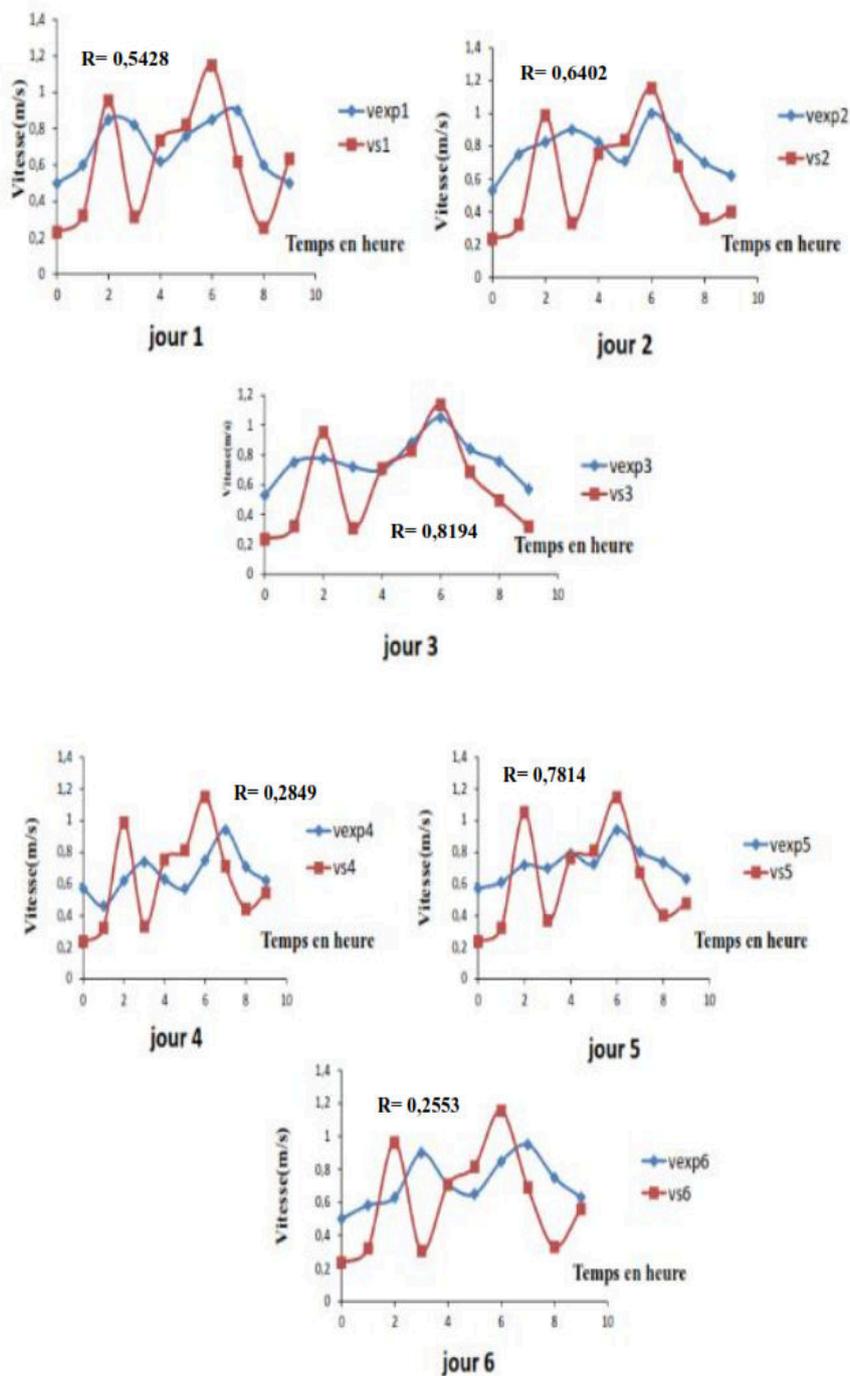


Fig. 7. Comparaison des vitesses simulée et expérimentale dans la serre de séchage solaire

A l'observation de la figure 8, on note que du 1<sup>er</sup> au 6<sup>e</sup> jour de séchage, les valeurs des vitesses de l'air de séchage simulée par le logiciel COMSOL, ne sont globalement en concordance avec celles des tests réalisés expérimentalement. En effet, les coefficients de corrélation R obtenus au cours des 6 jours d'essai de séchage entre les valeurs simulées et expérimentales de vitesse de séchage de l'air varient entre 0,2553 (minimum) et 0,8194 (maximum). Le grand écart observé au niveau des courbes de vitesse de l'air peut s'expliquer par les hypothèses simplificatrices émises au début de la modélisation ; notons également pour expliquer cet écart, la non prise en compte d'une éventuelle variation de la vitesse de l'air à l'entrée du séchoir ; en effet, elle est supposée constante alors qu'elle pourrait varier au cours du temps. Ces résultats sont en conformité avec ceux l'étude expérimentale et la modélisation numérique pour le séchage du raisin sous serre solaire [18].

### 3.3 ETUDE COMPARATIVE DE L'ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU DES FÈVES DE CACAO

Les résultats de l'étude comparative entre les données des valeurs simulées de la teneur en eau des fèves et celles obtenues expérimentalement sont présentés à la figures 9. Ils présentent l'évolution de la teneur en eau dans les fèves en fonction du temps.

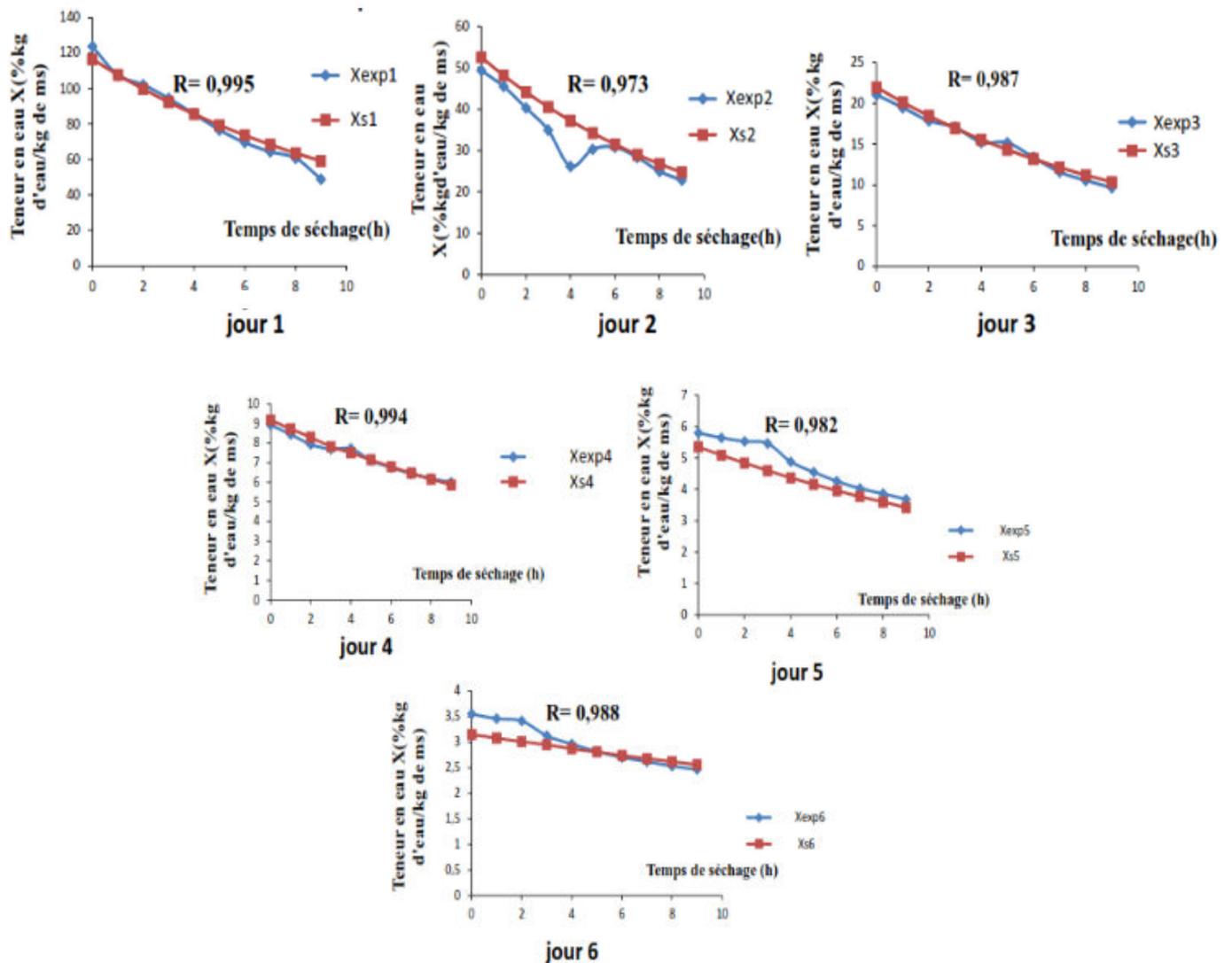


Fig. 8. Comparaison des courbes d'évolution des teneurs en eau simulée et expérimentale des fèves de cacao séchées au soleil dans une serre

L'analyse de la figure 9 montre en général une assez bonne concordance entre courbes simulées et expérimentales pour la teneur en eau du produit. Cette concordance est confirmée par des coefficients de corrélations proches de 1. En effet, on note que du 1<sup>er</sup> au 6<sup>e</sup> jour de séchage, les valeurs des teneurs en eau simulée par COMSOL Multiphysics, sont globalement identiques

à celles des expériences. En plus, les coefficients de corrélation R obtenus au cours des 6 jours d'essai de séchage entre les valeurs simulées et expérimentales de teneur en eau varient entre 0,973 (minimum) et 0,995 (maximum). Ces résultats sont en conformité avec ceux de l'étude expérimentale et la modélisation numérique pour le séchage du raisin sous serre solaire [18].

#### 4 CONCLUSION

Ce travail a fait l'objet du développement et de la validation d'un modèle numérique à échelle de laboratoire. Nous avons présenté dans cette étude une modélisation des différents éléments qui constituent un système de séchage par convection naturelle. Les profils des teneurs en eau des fèves et des différentes caractéristiques de l'air ont été représentés et confrontés à ceux du modèle numérique en vue de valider les résultats prédits par la simulation numérique. On observe en général une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés ; ce qui permet une validation du modèle numérique du séchoir solaire.

Afin d'améliorer ce travail il serait intéressant de définir des lois de variation des paramètres initiaux d'entrée du modèle et réduire les hypothèses simplificatrices émises.

#### REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier L'institut UniLaSalle, pour sa franche collaboration, surtout pour l'acquisition de la License COMSOL. Nous n'oublions pas l'INP-HB de Yamoussoukro et\* Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan respectivement pour les équipements de séchage et le financement des essais expérimentaux.

#### 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 à l'Université FHB de Cocody-Abidjan le 20/12/2013*.
- [2] S. Toure and S. Kibangou-Nkembo, Chp 463: A numerical model and experimental study of natural solar drying of cassava in Abidjan (Côte d'Ivoire), World Renewable Energy Congress VI, 2000, Elsevier pp. 2155-2158, 2000.
- [3] S. TOURE and S. KIBANGOU-NKEMBO, "Comparative study of natural solar drying of cassava, banana and mango", *Renewable Energy*, vol. 29, n° 6, pp 975 – 990, 2004.
- [4] Warda Belachi., "Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaire", *Mémoire de magister, soutenue à L'Université Kasdi Merbah Ouargla, Département de physique le 15/02/2009*.
- [5] Peyre, A., Zéau, Y., Analyse de l'utilisation de l'énergie solaire pour le séchage agricole : Programme interdisciplinaire de recherche pour le développement de l'énergie solaire, C.N.R.S.-PIRDES, 1979.
- [6] Nganhou J., Nganya T., Simulation numérique du comportement dynamique d'un système de séchage solaire de fèves de cacao au Cameroun, Laboratoire d'Energétique (LAEN), ENSP – Yaoundé, Cameroun, 2003.
- [7] Akmel C., "Séchage Solaire des fèves de cacao : étude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage", *Thèse de doctorat, soutenue à L'Université d'Abobo-Adjamé Abidjan le 22/07/2010*.
- [8] A., SEGHIR., *chapitre 2 : Méthode des éléments finis*, 2014 [Online], Available: <http://univ-bejaia.dz/a.seghir/?p=mef/mef>, november 24, 2019.
- [9] Zienkiewicz O. C. and Newton R. E., 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, J. Z. Zhu, Chapter 1: The Standard Discrete System and Origins of the Finite Element Method, *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals*, Elsevier, Seventh Edition, pp 1-20, 2013.
- [11] Mitra, S. and Sinhamahapatra K.P., "2D simulation of fluid-structure interaction using finite element method", *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 45, pp52 - 59, 2008.
- [12] Liu, G., R. and Quek-jerry S. S., "A non-reflecting boundary for analyzing wave propagation using the finite element method", *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 39, pp 403-417, 2003.
- [13] Incropera, F.P and DeWitt D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [14] Benkhelfellah, R., El Mokretar S., Miri, R. et M. Belhamel., Séchage des produits agro-alimentaires dans un séchoir solaire direct. *12èmes Journées Internationales de Thermique* Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.
- [15] Hallak, H., Hilal, J., Hilal, F. et Rahhal, R., "The staircase solar dryer: design and characteristics"; *Renewable Energy*, Vol. 7, n° 2, pp 177-183, 1996.

- [16] N., Chahal, "Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect"; *Mémoire de Magister Université Mentouri – Constantine d'Algérie*, soutenu 16 décembre 2007.
- [17] Matallah, A., "Séchage solaire des arachides par trois modes différents : Etude comparatif et aspect qualité" ; *Mémoire de master Université Kasdi Marbah Ouargla d'Algérie*, soutenu le 16 juin 2013.
- [18] I., Hamdi, S. Kooli, A., Elkhadraoui, Z., Azaizia, F., "Abdelhamid, A., Guizani, Experimental study and numerical modeling for drying grapes under solar greenhouse", *Renewable Energy*, Vol 127 pp 936-946, 2018.