

## Développement d'un modèle numérique pour la conception d'un séchage solaire sous serre des produits alimentaires

M. Al-Masri<sup>1\*</sup> et K. Kahline<sup>2†</sup>

<sup>1</sup> Université Libanaise, Faculté des Sciences, Tripoli, Liban

<sup>2</sup> Université Libanaise, IUT de Saïda, B.P. 813, Saïda, Liban

(reçu le 25 Mai 2012 – accepté le 30 Juin 2013)

**Résumé** – *Le but de ce travail est d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés du séchage solaire, il apparaît nécessaire d'établir des règles de conception moins empiriques et prenant mieux en compte les processus mis en jeu. La modélisation du séchage solaire sous serre a pour but de prévoir l'évolution des teneurs en eau jusqu'à atteindre la valeur souhaitée. Par ailleurs la conception du modèle devra prendre en compte tous les échanges entre le produit humide et son environnement ainsi que son comportement durant le séchage pour obtenir des prédictions authentiques et de pouvoir intégrer la prise en compte des conditions climatiques locales variables pendant le temps du lieu d'implantation du dispositif de séchage. Le modèle de simulation numérique est basé sur les bilans thermiques, massiques et de corrélations donnent les variations des paramètres climatiques. Ces bilans seront résolus par méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 dans l'environnement Matlab a pour résultat: la teneur en eau du produit et la température de l'air intérieur de serre, du produit et de la couverture. On fait des études de l'influence des conditions opératoires sur la cinétique de séchage, l'effet de condition climatique sur la vitesse de séchage, performances climatiques de la serre, comparaison entre deux considérations de simulation numérique: l'un de conditions climatiques variables pendant le temps et l'autre de conditions climatiques fixe pendant le temps. La validation du modèle s'effectue avec un cas réel (Station de Brumath) en trouvant une bonne concordance avec le modèle simulé et les valeurs expérimentales. On cherche la courbe de séchage de différents produits.*

**Abstract** - *The aim of this work is to improve the energy efficiency of solar drying, it appears necessary to establish design rules less empirical and taking better account of the processes involved. Modeling of solar drying greenhouse aims to predict the evolution of water content to the desired value. Moreover, the model design must take into account all interactions between the wet product and its environment and its behavior during drying to obtain predictions authentic and able to integrate the consideration of local climate variables during the time of the site implantation of the drying device. The numerical simulation model is based on the heat balance, mass balance and correlations give the variations of climate parameters. These equations will be solved by Runge-Kutta method of order 4 in the Matlab environment has resulted in: the moisture content of the product and the temperature of interior air of greenhouse and the temperature of the product and the cover. We studied the influence of operating conditions on drying kinetics, the effect of weather conditions on the drying rate, performance of the greenhouse climate, Comparison of two numerical simulation considerations: one of variable weather conditions during the time and the other conditions for fixed time. The validation of the model is performed with a real case (Station Brumath) finding a good agreement with the model simulated and experimental values. We seek the drying curve of different products.*

---

\* mkm\_1988@hotmail.com

† kkahine@ul.edu.lb

**Mots clés:** Séchage solaire - Cinétique de séchage – Ensoleillement – Siccité - C.C.S. - Simulation numérique - Transfert thermique et massique - Serre.

## 1. INTRODUCTION

Le séchage est un procédé d'extraction d'eau d'un solide, d'un semi-solide ou d'un liquide par évaporation. Cette opération nécessite une source de chaleur.

Le séchage solaire sous serre utilise 'l'effet serre' pour accélérer le processus d'élimination de l'eau contenue dans les produits à sécher. L'échauffement de la surface du produit, grâce au rayonnement solaire et au rayonnement infrarouge émis par le matériau transparent de la serre, permet d'augmenter la pression de vapeur d'eau à la surface et par suite de favoriser l'évaporation. Un flux d'air frais généré par un ventilateur et admis sous la serre permet d'évacuer la vapeur d'eau issue du séchage.

Dans cette méthode, le taux de séchage est contrôlé par des facteurs externes, tels que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative, et des facteurs internes tels que la teneur en eau initiale, le type des produits et la masse du produit par unité de surface d'exposition.

Au cours du séchage solaire d'un milieu poreux, les transferts de chaleur et de masse s'effectuent d'une façon couplée. Le transport de masse est celui de la vapeur d'eau entre la surface du produit et de l'air asséchant. Dans notre travail, on vise à mettre cette méthode dans un cadre scientifique en développant un modèle de simulation basé sur une approche thermodynamique des éléments et des conditions intervenant dont les conditions climatiques extérieures (rayonnement solaire, température extérieur, humidité relative de l'air) sont variables pendant le temps.

## 2. MODELISATION DE SYSTEME

Le séchage solaire des produits sur la mise en contact, sous une serre, d'un air régulièrement renouvelé. Un système de ventilation assure un écoulement de l'air dans la serre afin de favoriser le transfert de l'eau interstitielle dans l'atmosphère et d'évacuer l'air humide.

Les éléments de base à représenter pour construire un modèle de sécheur solaire direct sont les suivants:

L'environnement extérieur, la couverture, l'air intérieur, le produit à sécher et le support sur lequel repose le produit.

Les différents modes de transferts thermiques mis en jeu dans la serre sont:

- Les apports solaires au travers du matériau de la couverture;
- Les échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre les différents éléments;
- Les échanges de convection à la surface de la couverture et à celle du produit;
- L'évaporation au niveau du produit;
- Le renouvellement d'air dû à la perméabilité de la serre ou à une ventilation mécanique.

Le modèle que nous proposons repose sur une approche globalement similaire: c'est un modèle de connaissance dynamique mono dimensionnel, qui s'articule autour de la formulation des bilans d'énergie instantanés de différents composants de la serre.

Chacun des éléments du modèle est caractérisé par une variable d'état: la température. Le produit est en plus caractérisé par sa teneur en eau. On retiendra l'hypothèse d'une distribution uniforme des différentes variables.

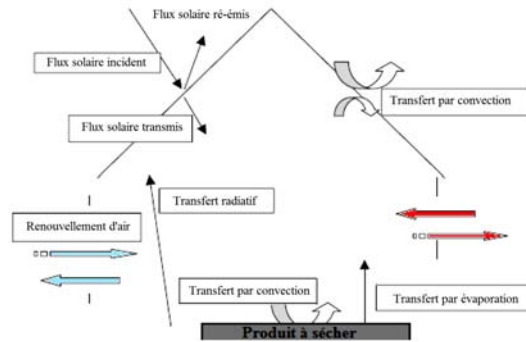


Fig. 1: Schéma d'une serre de séchage

Eléments et mécanismes à prendre en compte dans un modèle de sécheur solaire

On suppose également que:

- La serre est considérée comme un système physique, dont les conditions aux limites sont les données météorologiques ( $T_{ae}$ ,  $H_r$ ,  $U_v$ ,  $R_g$ );
- 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.
- La convection des faces latérales avec le milieu extérieur, ainsi que l'intérieur de la serre et ceux des radiations solaires captées par les faces latérales de la serre sont négligés.
- L'échange conductif entre le produit et son support est négligé.

## 2.1 Bilans thermiques et massique

Pour élaborer le modèle mathématique, la méthode des bilans thermiques pour chaque composant est utilisée. En évaluant les gains et les pertes, ces bilans traduisent le principe de conservation de l'énergie appliqué à chaque élément du modèle.

*Bilan thermique sur la couverture*

$$C_c \times \frac{dT_c}{dt} = R_g \times \alpha_c (1 + \tau_c \times \rho_p) + \sigma \times \varepsilon_c (T_v^4 - T_c^4) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \times (T_p^4 - T_c^4) + h_{ci} \times (T_{ai} - T_c) + h_{ce} \times (T_{ae} - T_c) \quad (1)$$

*Bilan thermique sur l'air intérieur*

$$\rho \times V \times C_{p_{ai}} \times \frac{dT_{ai}}{dt} = h_{pi} \times S_p (T_p - T_{ai}) + h_{ci} \times S_c (T_c - T_{ai}) - \rho \times Q \times C_{p_{ai}} (T_{ai} - T_{ae}) \quad (2)$$

Avec,  $Q = N \times V$

*Bilan thermique sur le produit à sécher*

$$m \times C_{pp} \times \frac{dT_p}{dt} = h_{pi} \times S_p \times (T_p - T_{ai}) + R_g \times S_p \times \alpha_p \times \tau_c - \frac{\sigma \times S_p}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \times (T_p^4 - T_c^4) - \dot{m} \times L_v \quad (3)$$

$$\text{Avec, } C_{pp} = \frac{1}{1+X} \times C_{psec} + \frac{X}{1+X} \times C_{peau}$$

*Bilan massique- Débit d'eau évaporée*

La vitesse de séchage  $(-d\bar{X}/dt)$  est normée ou réduite (C.C.S) par la vitesse de la première phase  $(-d\bar{X}/dt)_1$ , qui peut soit être déduite théoriquement ou mesurée sur la courbe expérimentale  $(-d\bar{X}/dt) = f(X_r)$ .

La quantité de chaleur est liée à celle de matière via la chaleur latente de vaporisation.

$$Q = M_s \times \left( -\frac{dX}{dt} \right) \times L_v \quad (4)$$

$$\frac{dm}{dt} = M_s \times \left( -\frac{dx}{dt} \right)$$

$$\left( -\frac{dX}{dt} \right)_1 = \frac{S_p}{M_s \times L_v} \left[ R_g \times \alpha_p \times \tau_c + h_{cp} \times (T_{ai} - T_h) - \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \times (T_h^4 - T_c^4) \right] \quad (5)$$

### 3. FORMULATION MATHÉMATIQUE DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES

Les données climatiques horaires que l'on doit introduire dans le modèle peuvent représenter une masse de données très importante, surtout si celui-ci doit fonctionner en simulation sur plusieurs journées successives.

Notre objectif est de pouvoir rendre compte correctement des variations journalières de températures, d'humidité et de rayonnement solaire pour pouvoir alimenter et vérifier notre modèle de séchage à cette échelle de temps. Nous avons donc couplé à notre modèle, un générateur de données climatiques qui permet de reconstituer au pas horaire une journée climatique 'type'.

#### 3.1 Corrélation de la température de l'air ambiant

L'équation (6) donne l'évolution horaire de la température de l'air extérieur. Cette équation, résulte d'une étude statistique réalisée sur un échantillon de stations climatiques du réseau météorologique français [5].

$$T_{ae}(t) = T_{ae_{min}} + Kt(t) \times (T_{ae_{max}} - T_{ae_{min}}) \quad (6)$$

Les températures journalières maximale et minimale sont des données locales fournies par une station météorologique.

### 3.2 Corrélation de l'humidité relative de l'air

L'équation (7) donne l'évolution de l'humidité relative extérieure obtenue dans les mêmes conditions que celle de la température de l'air ambiant. [1]

$$H_r(t) = H_{r_{max}} \times (H_{r_{max}} - H_{r_{min}}) \quad (7)$$

Les humidités relatives journalières maximale et minimale sont des données locales fournies par une station météorologique.

### 3.3 Gisement solaire

Le calcul du rayonnement solaire global qui arrive sur une surface horizontale met en œuvre [2], d'une part les formules exactes de mécanique céleste qui donnent pour un instant et en un lieu géographique donné, la position du soleil dans le ciel, et d'autre part des formules semi-empiriques qui traduisent les phénomènes d'extinction atmosphérique dus à la densité nuageuse et à l'état de limpidité de l'atmosphère.

## 4. RESOLUTION DE BILANS

Le modèle de simulation numérique inspiré du 'Concept de Courbe de Séchage' [4] est basé sur les bilans thermiques, massiques et de corrélations donnant les variations des paramètres climatiques. Ces bilans déterminent un système d'équations différentielles non linéaires dont les inconnus sont les variables d'état ( $T_{ae}$ ,  $T_c$ ,  $T_p$  et  $X$ ). Ce système d'équations sera résolu par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 dans l'environnement Matlab. Chaque produit utilisé a de caractéristiques spécifiques représentées par  $f(X_r)$ , siccité initiale et de leurs caractéristiques optiques. On peut étudier la cinétique de séchage de n'importe quel produit en changeant ces caractéristiques. Les études suivantes concernant la boue a pour caractéristiques:

$$X_i = 5.135 \text{ kg eau / kg Ms} ; \alpha_p = 0.8 ; \rho_p = 0.2$$

$$f(X_r) = 2.37 \times X_r - 3.3 \times X_r^2 + 1.92 \times X_r^3$$

## 5. INFLUENCE DES CONDITIONS OPERATOIRES SUR LA CINETIQUE DE SECHAGE

La vitesse de séchage du produit calculée théoriquement dépend des conditions externes (température extérieure, humidité relative, rayonnement solaire) et de la vitesse de l'air asséchant dans la serre.

### 5.1 Influence de la température extérieure

Dans le but d'étudier l'influence de la température, on prend trois cas en variant la température extérieure de trois façons différentes pendant deux jours consécutifs et on prend les autres paramètres ( $H_r$ ,  $R_g$  et  $U_i$ ) qui sont identiques pour les trois cas.

La moyenne de température de l'air extérieur est indiquée sur la figure 2:

-Cas 1-  $\overline{T_{ae}} = 15^{\circ}\text{C}$  ; -Cas 2-  $\overline{T_{ae}} = 20^{\circ}\text{C}$  ; -Cas 3-  $\overline{T_{ae}} = 28^{\circ}\text{C}$  ;

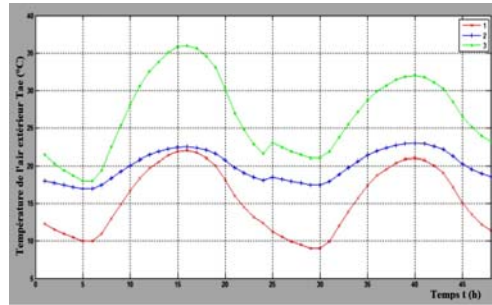


Fig. 2: Evolution de la température extérieure dans les trois cas et selon les deux jours consécutifs

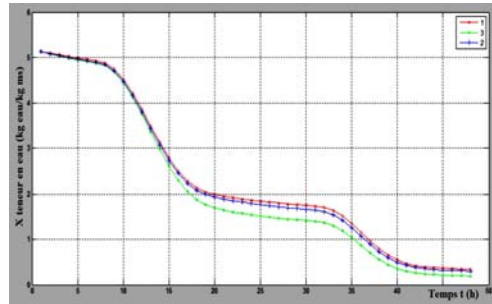


Fig. 3: Evolution de la teneur en eau dans les trois cas et selon les deux jours consécutifs

La figure 3 montre bien que lorsque la température ambiante augmente, la vitesse de séchage augmente. En effet, la croissance de la température extérieure aboutit à une augmentation de la température humide, de la température intérieure et la température de la couverture, de façon que la température intérieure et la température de couverture augmente plus vite que la température humide, ce qui conduit à une élévation de la vitesse de séchage à phase constante.

## 5.2 Influence du rayonnement solaire

Dans le but d'étudier l'influence du rayonnement solaire, on prend trois valeurs différentes de l'intensité du rayonnement solaire  $R_g$  sur trois mois différents et en gardant les mêmes valeurs des paramètres  $H_r$ ,  $T_{ae}$  et  $U_i$  pour les trois cas. (Fig. 4)

La moyenne du rayonnement solaire respectivement pour le mois Février, Avril et Décembre est donnée ci-après.

$$\overline{R_g} = 230 \text{ W/m}^2 ; \overline{R_g} = 275 \text{ W/m}^2 \text{ et } \overline{R_g} = 200 \text{ W/m}^2 .$$

En fait, la vitesse de séchage à phase constante est fortement liée au rayonnement solaire. L'intensité du rayonnement solaire la plus grande correspond au séchage le plus performant comme indiqué sur la figure 5.

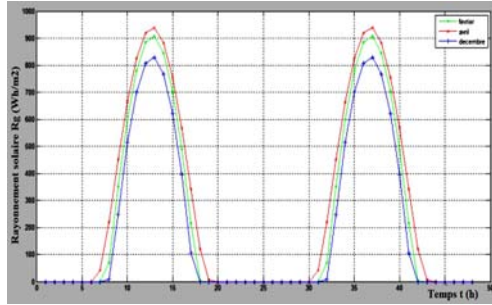


Fig. 4: Evolution de  $R_{og}$  pendant deux jours consécutifs sur trois mois différents

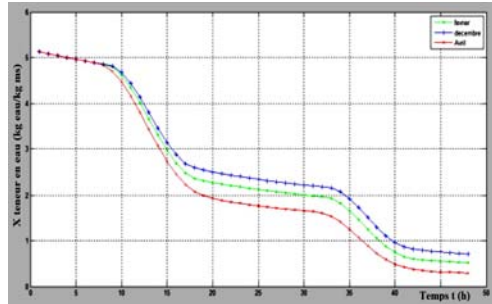


Fig. 5: Evolution de la teneur en eau pendant deux jours consécutifs sur trois mois

### 5.3 Influence de l'humidité relative

Dans le but d'étudier l'influence de l'humidité relative  $H_r$ , on considère trois cas différents de cette humidité pour des valeurs données des autres paramètres: paramètres  $R_g$ ,  $T_{ae}$  et  $U_i$ . La moyenne de l'humidité relative est indiquée sur la figure 6 et pour les trois cas suivants.

$$\overline{H_r} = 65.6\% ; \overline{H_r} = 53.4\% ; \overline{H_r} = 16.4\%$$

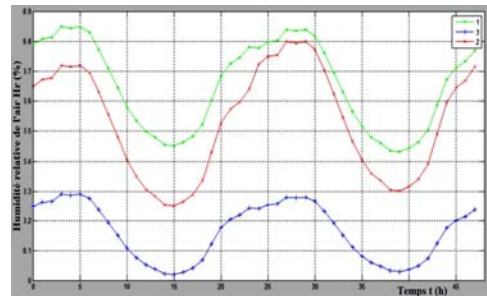


Fig. 6: Evolution de l'humidité relative pour les jours consécutifs, pour les trois cas

La vitesse à phase constante est liée à la température humide de façon que lorsque la température augmente, la vitesse diminue. La température humide est liée à l'humidité relative de telle façon que la température humide augmente avec l'augmentation de l'humidité relative, donc l'augmentation de l'humidité et diminue la vitesse de séchage.

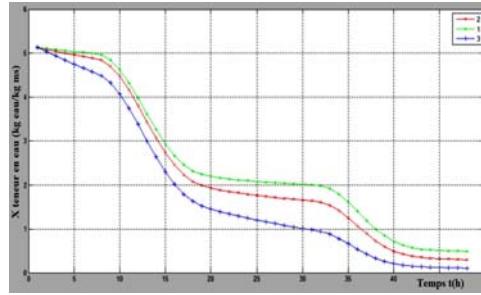


Fig. 7: Evolution de la teneur en eau, sur deux jours consécutifs, pour différents cas

#### 5.4 Influence de la vitesse de l'air asséchant

Dans le but d'étudier l'influence de la vitesse de l'air asséchant sur la vitesse de séchage, on considère trois valeurs différentes de cette vitesse en fixant les autres paramètres  $R_g$ ,  $T_{ac}$  et  $H_r$ .

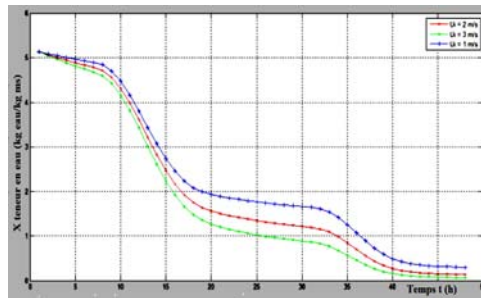


Fig. 8: Evolution de la teneur en eau sur deux jours consécutifs et différentes vitesses

Le coefficient d'échange par convection est lié symétriquement à la vitesse superficielle de l'air, par suite affecte le taux d'eau évaporée. Ainsi, la vitesse de séchage est influencée.

### 6. COMPARAISON DE L'EFFET DE CONDITION CLIMATIQUE SUR LA VITESSE DE SECHAGE

L'influence des quatre variables 'Intensité de rayonnement solaire, Température de l'air extérieur, Vitesse de l'air asséchant et Humidité relative de l'air' sur la vitesse de séchage peut être quantifiée en appliquant la méthode 'One-Factor-At-A-Time' de la méthode 'Screening Designs' [1].

La méthode est utilisée pour la vitesse de séchage à phase constante et avec ces quatre variables.

L'indice de sensibilité [7] permet d'avoir une base quantitative pour exprimer la sensibilité de la vitesse de séchage vis-à-vis des variables d'entrée. Une valeur négative indique que la variable d'entrée et la vitesse de séchage varient en sens inverse.

Plus grand est l'indice de sensibilité en valeur absolue, plus grand est l'impact qu'une variable pourrait avoir sur la vitesse de séchage.



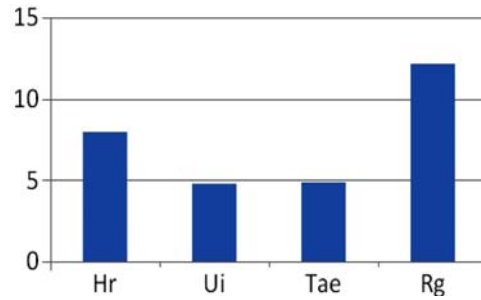


Fig. 9: Pourcentage de variation de paramètres d'entrée du modèle

Les figures 9 et 10 présentent la plus grande influence sur la vitesse à phase constante par l'intensité de rayonnement solaire avec une variation moyenne [6] produite d'environ 12.15 % et un indice de sensibilité de 0.6273.

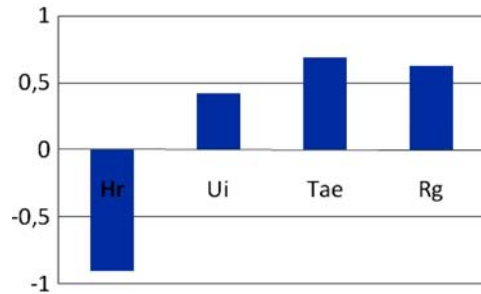


Fig. 10: Indice de sensibilité de la vitesse à phase constante par rapport aux entrées du modèle

L'humidité relative est le deuxième paramètre important avec une variation moyenne de 8 % et un indice de sensibilité de - 0.8993. Le signe négatif signifie que lorsque l'humidité augmente, la vitesse de séchage diminue. La température de l'air extérieur joue également un rôle très important avec un indice de 0.6877, la variation de vitesse de l'air asséchant a un rôle important avec un indice de 0.4215.

Toutefois les résultats d'une analyse de sensibilité doivent être manipulés avec précaution. En effet, la sensibilité apparente d'un modèle à un paramètre donné dépend de l'importance, durant la période choisie, du processus que ce paramètre affecte.

## 7. PERFORMANCES CLIMATIQUES DE LA SERRE

La couverture est le principal vecteur des transferts énergétiques de la serre vers le milieu extérieur. Une bonne couverture doit en principe laisser pénétrer dans la serre le maximum de rayonnement solaire, et limiter au maximum les déperditions thermiques par rayonnement infrarouge long, mais aussi par convection et conduction (cas de matériaux épais).

### 7.1 Interaction température de l'air extérieur- intérieur

La figure 11 présente l'évolution des températures de l'air intérieur et extérieur. On constate que la température de l'air intérieur est plus importante que celle de l'air

extérieur pendant la journée un écart de 23 °C pour le premier jour et de 30 °C pour le deuxième jour, mais pendant la nuit on trouve une équivalence entre les deux cas avec un décalage de quelques degrés par rapport à la température extérieure.

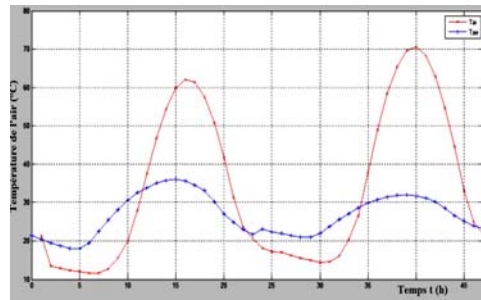


Fig. 11: Evolution des températures de l'air extérieur et intérieur par simulation

En effet, l'augmentation et la diminution de la température intérieure résulte de l'effet de serre qui conjugue deux phénomènes: l'un radiatif et l'autre convectif.

### Effet radiatif

La paroi des serres est en principe perméable au rayonnement solaire visible et infrarouge de courte longueur d'onde et faiblement perméable au rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde émis par les corps terrestres, y compris l'atmosphère libre.

De jour, les produits abrités par la serre absorbent le rayonnement solaire, s'échauffent et émettent davantage d'énergie radiative, sous grande longueur d'onde. De nuit, le rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde est seul présent et l'interposition, au-dessus du produit, d'une paroi absorbante ou le réfléchissant réduit les déperditions radiatives nettes.

L'effet radiatif de serre dépend de la caractéristique optique des matériaux de couverture à l'égard du rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde.

### Effet convectif

Par suite de l'échauffement d'origine radiative, l'air devenant moins dense, tend à être remplacé par de l'air froid. L'étanchéité de la serre réduisant cette convection accroît l'effet 'positif' de serre, mais dans certains cas provoque une inversion de température ( $T_{ai}$  plus basse que  $T_{ae}$ ). Cette inversion de température s'explique par l'insuffisance des échanges convectifs à compenser la perte convectif des éléments situés à l'intérieur de l'enceinte.

## 8. ETUDE DE CAS REEL

La station d'épuration de Brumath (Alsace, France) dispose d'une unité de séchage solaire sous la forme de deux serres identiques. Les serres sont de type « serre ouvrant » [1]. Les mesures expérimentales, effectuées les 11 et 12 Juillet, sont pour les quatre paramètres, soit  $T_{ai}$ ,  $T_{ae}$ ,  $H_r$  et  $R_g$ .

La connaissance de la température de l'air intérieur permettra d'estimer les besoins de quantité d'énergie à injecter dans le système, soit des besoins de ventilation, d'où la connaissance de l'évolution de la température de l'air intérieur au cours du temps.

On prend trois valeurs de vitesse de l'air asséchant  $U_i = 1, 2$  et  $3$  m/s. En été, la vitesse moyenne de l'air varie de 1 jusqu'à 3 m/s.

La figure 12 représente l'évolution de température de l'air intérieur expérimentale et simulée dans des conditions climatiques du 11 et 12 Juillet. On remarque une bonne corrélation, donc on peut estimer la température de l'air intérieur dans la serre avec une grande précision d'erreur type [7], soit de  $\pm 4$  °C.

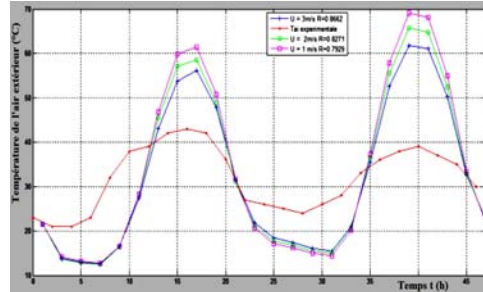


Fig. 12: Evolution de la température de l'air intérieur expérimentale et simulée

## 9. COURBE DE SECHAGE POUR CERTAINS PRODUITS

Notre programme est valable quelque soit le produit étudié. A chaque produit, on a la caractéristique spécifique, en changeant le paramètre relié au produit, on obtient leur courbe de séchage.

### 9.1 Cas du géranium

Le géranium a les caractéristiques suivantes:

- Vitesse de séchage réduite [3]

$$f(X_r) = 1.3171 \times X_r - 0.6568 \times X_r^2 - 4.1959 \times X_r^3 + 3.2026 \times X_r^4$$

- Teneur en eau initiale [3]

$$X_i = 4.1 \text{ kgeau/kgms}$$

Tableau 1: Paramètres climatiques d'entrée

Paramètres	Cas 1		Cas 2		Cas 3	
	1 <sup>er</sup>	2 <sup>ème</sup>	1 <sup>er</sup>	2 <sup>ème</sup>	1 <sup>er</sup>	2 <sup>ème</sup>
T <sub>ae max</sub> (°C)	22	21	22.5	23	36	32
T <sub>ae min</sub> (°C)	10	9	17	17.5	18	21
H <sub>r max</sub> (%)	85	84	72	80	72	80
H <sub>r min</sub> (%)	45	43	25	30	25	30
U <sub>i</sub> (m/s)	2	2	1	1	1	1
U <sub>v</sub> (m/s)	2.2	2.2	1.2	1.2	1.2	1.2
R <sub>g</sub> du mois	12	12	4	4	7	7

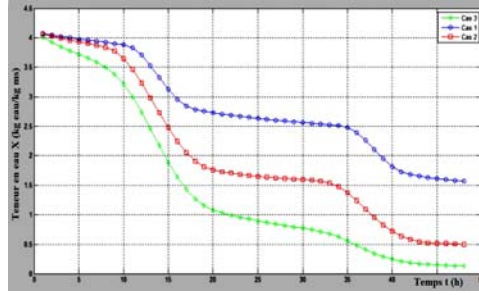


Fig. 13: Courbes de séchage du géranium dans des conditions opératoires différentes

Dans la figure 13, on montre l'évolution de la teneur en eau (courbe de séchage) pour des conditions opératoires différentes.

### 9.2 Cas de la plante guérissante

La plante guérissante a les caractéristiques suivantes:

- Vitesse de séchage réduite [3]

$$f(X_r) = 0.9068 \times X_r + 0.1228 \times X_r^2 - 1.1846 \times X_r^3 + 0.9284 \times X_r^4$$

- Teneur en eau initiale [3]

$$X_i = 6 \text{ kg eau / kg ms}$$

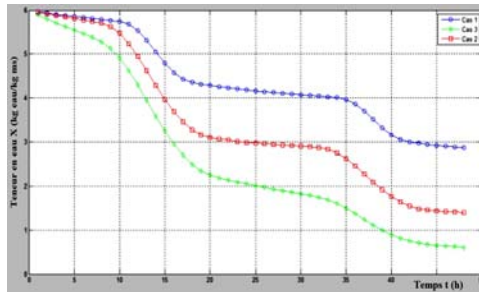


Fig. 14: Courbes de séchage de la plante dans des conditions opératoires différentes

Dans la figure 14, on montre l'évolution de la teneur en eau (courbe de séchage) pour des conditions opératoires différentes.

## 10. COMPARAISON ENTRE LES DEUX PROCESSUS DE SIMULATION NUMERIQUE

Dans cette partie, nous faisons une comparaison entre deux processus de simulation numériques de séchage sous serre. La première considération (modèle 1) a des paramètres climatiques variables et pour la deuxième considération (modèle 2) des paramètres climatiques constants (prenons les valeurs moyennes comme valeurs pour ces paramètres). Le deuxième modèle a été validé par [1] dans un laboratoire.

On remarque sur la figure 15 que les deux modèles donnent le même résultat à la fin de phénomène de séchage. Mais la variation de vitesse de séchage, représenté par le

modèle 1 par la pente de la courbe, n'est pas représentée dans le modèle 2 qui demeure constant.

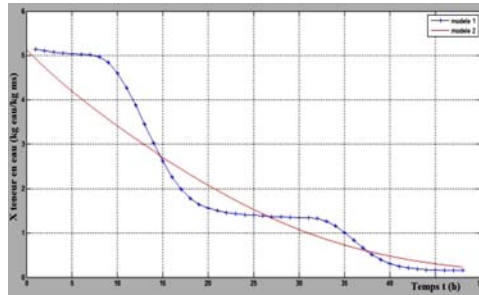


Fig. 15: Comparaison de l'évolution de la teneur en eau pour les deux modèles

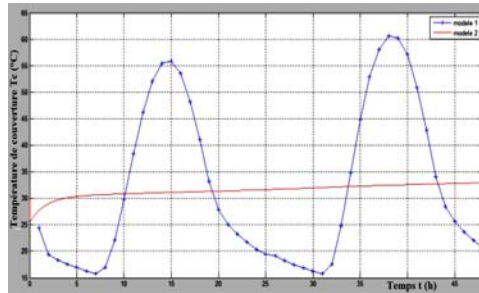


Fig. 16: Comparaison de l'évolution de la température de couverture pour les deux modèles

Le modèle 2 donne une idée de la teneur en eau en fin de séchage. Mais dans le cas des températures ( $T_c$ ,  $T_{ai}$  et  $T_p$ ), le modèle 2 ne donne pas l'évolution des températures pendant le temps, mais seulement leur valeur moyenne (Fig. 16), ce qui permet au modèle 1 une estimation meilleures des températures, et également le besoin de chauffage et de ventilation.

## 11. CONCLUSION

On développe et on valide un modèle numérique de séchage solaire sous serre pour des entrées climatiques variables ( $T_{ae}$ ,  $H_r$ ,  $R_g$ ). Ce modèle est compatible pour tous les produits à sécher en remplaçant les paramètres liés à l'agent humide.

La courbe de séchage dépend des caractéristiques spécifiques représentées par la vitesse réduite, la teneur en eau initiale et leurs caractéristiques optiques, et aussi dépend de conditions opératoires appliqués au produit à sécher.

## NOMENCLATURE

$t$  : Temps, h

$S_p$  : Surface du produit,  $m^2$

$S_c$  : Surface de la couverture de la serre,  $m^2$

$U_i$  : Vitesse de l'air dans la serre, m/s

$V$ : Volume de la serre, $m^3$	$U_v$ : Vitesse du vent, m/s
$k_r(t)$ : Coefficient de calcul, humidité relative, fonction du temps et de la saison	$k_t(t)$ : Coefficient de calcul, température, fonction du temps et de la saison
$X_i$ : Teneur en eau initiale, kg eau/kg ms	$X_r$ : Teneur en eau réduite, kg eau/kg ms
$X$ : Teneur en eau du produit en base sèche, kg eau/kg ms	$f(X_r)$ : Vitesse de séchage réduite
$(-dX/dt)$ : Vitesse de séchage à un instant $t$ , kg eau/kg ms.h	$(-dX/dt)_1$ : Vitesse de séchage à phase constante, kg eau/kg ms.h
$M_s$ : Masse sèche du produit, kg	$m$ : Masse totale du produit humide, kg
$\dot{m}$ : Vitesse d'évaporation d'eau, kg eau/h	$H_{rmax}$ : Humidité relative de l'air max., %
$R_g$ : Intensité du rayonnement solaire, $W/m^2$	$H_r$ : Humidité relative de l'air, %
$T_h$ : Température humide de l'air ext., °C	$H_{rmin}$ : Humidité relative de l'air min., %
$T_{ai}$ : Température de l'air à l'intérieur de la serre, °C	$T_{ae}$ : Température de l'air à l'extérieur de la serre, °C
$T_{aemax}$ : Température maximale de l'air à l'extérieur de la serre, °C	$T_{aemin}$ : Température minimale de l'air à l'extérieur de la serre, °C
$T_v$ : Température du voute céleste, °C	$T_c$ : Température de la couverture de la serre, °C
$C_c$ : Capacité thermique surfacique de la couverture, $J/kg.K.m^2$	$C_{pai}$ : Capacité thermique de l'air intérieur, $J/kg.K$
$C_{pp}$ : Capacité thermique du produit, $J/kg.K$	$C_{peau}$ : Capacité thermique de l'eau, $J/kg.K$
$C_{psec}$ : Capacité thermique du produit sec, $J/kg.K$	$N$ : Nombre de volume de la serre renouvelé par heure, $h^{-1}$
$Q$ : Débit d'air de la serre, $m^3/h$	$\alpha_c$ : Coefficient d'absorption de la couverture
$\alpha_p$ : Coefficient d'absorption du produit	$\tau_p$ : Coefficient de réflexion du produit
$\tau_c$ : Coefficient de transmission de la couverture	$\rho$ : Masse volumique de l'air, $kg/m^3$
$\sigma$ : Constante de Boltzman, $W/m^2.K^4$	$\epsilon_p$ : Emissivité du produit
$h_{ci}$ : Coefficient de convection entre l'air intérieur et la couverture, $W/m^2.K$	$\epsilon_c$ : Emissivité de la couverture
$h_{ce}$ : Coefficient de convection entre l'air extérieur et la couverture, $W/m^2.K$	$h_{pi}$ : Coefficient de convection entre l'air intérieur et le produit, $W/m^2.K$

## REFERENCES

- [1] H. Amadou, 'Modélisation du Séchage Solaire sous Serre des Boues de Stations d'Épuration Urbaines', Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2007.
- [2] P. Chouard, H. Michel et M.F. Simon, 'Bilan Thermique d'une Maison Solaire', Collection Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France (EDF), Edition Eyrolles, 1979.

- [3] A. Idlimam, A. Lamharrar, C.S.E. Kane, S. Akkad et M. Kouhila, 'Valorisation de trois Plantes Médicinales par Séchage Solaire Convectif en Couches Minces', Revue des Energies Renouvelables, SMSTS'08, pp. 151 – 156, Alger, 2008.
- [4] C. Moyne, 'Etablissement des Courbes de Séchage – Courbes Caractéristiques et Exploitation', Compte Rendu des Premières Journées Scientifiques de l'Association Française de Séchage dans l'Industrie et l'Agriculture (A.F.S.I.A.), 1985.
- [5] E. Choissnel, 'Le Bilan d'Energie et le Bilan Hydrique du Sol, La Météorologie', Vol. 11, pp. 103 – 133, 1977.
- [6] D.T. Favis-Mortlock and F.R. Smith, 'A Sensitivity Analysis of EPIC', In W. Sharpley, (Eds), EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator, 1. Model, 1990.
- [7] J.P.C. Jolicoeur, 'Screening Designs Sensitivity of a Nitrate Leaching Model (ANIMO) using a One-at-a-Time Method', State University of New York at Binghamton, 14 p., 2002.
- [8] L. Bosquet, 'Méthodologie de la Recherche', Université Lille 2, France.