



Modélisation et simulation du fonctionnement d'un séchoir solaire agroalimentaire

M. El Hisse, M. Fournier

► To cite this version:

M. El Hisse, M. Fournier. Modélisation et simulation du fonctionnement d'un séchoir solaire agroalimentaire. *Revue de Physique Appliquée*, 1988, 23 (6), pp.1161-1168. <10.1051/rphysap:019880023060116100>. <jpa-00245921>

HAL Id: jpa-00245921

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00245921>

Submitted on 1 Jan 1988

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
 Physics Abstracts
 44.00

Modélisation et simulation du fonctionnement d'un séchoir solaire agroalimentaire

M. El Hisse et M. Fournier

IMP du CNRS, Université de Perpignan, Avenue de Villeneuve, 66025 Perpignan Cedex, France

(Reçu le 22 décembre 1987, révisé le 11 février 1988, accepté le 8 mars 1988)

Résumé. — Un modèle mathématique simulant le fonctionnement d'un séchoir solaire agroalimentaire — modèle SERESOL basculant — est proposé. Les paramètres mal connus ont été identifiés à partir d'expériences menées en laboratoire dans un tunnel de séchage ventilé à atmosphère contrôlée. Le modèle a ensuite été validé au cours d'une expérience réelle de séchage *in situ* dans le séchoir solaire. Des résultats de simulations d'opérations de séchage sous différents climats sont alors présentés.

Abstract. — A mathematic model for describing the behaviour of an agroalimentary solar dryer — rocking model SERESOL — is proposed. The parameters used in the equations are derived from experimental laboratory data, and the model has been validated by a real experience *in situ*. Then some results of simulations of solar drying operations under different climates are presented.

Nomenclature

Majuscules :

AS	: Air sec.	
Aw	: activité de l'eau	(Sd)
Cp _a	: chaleur massique à pression constante de l'air	(J. kg ⁻¹ °C ⁻¹)
Cp _f	: chaleur massique à pression constante du fruit	(J. kg ⁻¹ °C ⁻¹)
CH	: paramètre de l'équation	
Dm	: coefficient de diffusivité	(m ² s ⁻¹)
Df	: diamètre de la tranche de fruits	(m)
FF	: facteur de forme	(Sd)
Go	: densité de débit massique d'air	(kg.s ⁻¹ m ⁻²)
Ha	: flux d'enthalpie molaire de l'air	(W/mole)
HR	: humidité relative de l'air	(%)
Ma	: débit massique de l'air	(kg.s ⁻¹)
Ms	: masse sèche du fruit	(kg)
P _f	: pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit	(Pa)
P _{va}	: pression partielle de vapeur d'eau dans l'air	(Pa)
P _{vs}	: pression partielle de vapeur saturante	(Pa)
P _T	: pression totale	(Pa)
PH	: paramètre de l'équation	
S _{cl}	: surface claie	(m ²)
S _{ech}	: surface d'échange des fruits	(m ²)
S _i	: surface de l'isolant au niveau d'une claie	(m ²)
Ta	: température de l'air	(K)
Te	: température extérieure	(K)

T_f	: température du fruit	(K)
V	: volume	(m ³)
V_b	: volume d'un <i>boîtier</i> ($S_{cl} \times h$)	(m ³)
X_a	: humidité absolue de l'air	(kg/kg.AS)

Minuscules :

a, b, c	: coefficients à identifier caractéristiques du fruit étudié.	
ca	: conductance de l'isolant	(WK ⁻¹)
ep	: épaisseur de la couche de fruit (tranche)	(m)
e_i	: épaisseur du caisson (paroi + isolant)	(m)
h	: distance entre deux claies	(m)
r	: rayon (coordonnées polaires, sphère ou cylindre)	(m)
rv	: constante des gaz parfaits	(J.kg ⁻¹ K ⁻¹)
t	: temps	(s)
x	: abscisse (coordonnée cartésienne)	(m)
w	: teneur en eau du produit base sèche	(kg/kg.Ms)
\bar{w}	: teneur en eau moyenne du produit base sèche	(kg/kg.Ms)

Lettres grecques :

α_T	: coefficient de transfert de chaleur convectif surfacique air-produit	(W.m ⁻² °C ⁻¹)
α_v	: coefficient de transfert de chaleur convectif volumique air-produit	(W.m ⁻³ °C ⁻¹)
β_m	: coefficient de transfert de masse produit-air	(m.s ⁻¹)
λ	: conductivité thermique	(W.m ⁻¹ K ⁻¹)
ΔH_v	: chaleur latente de vaporisation de l'eau	(J.kg ⁻¹)
Δp	: variation de pression	(Pa)
ΔT	: variation de température	(K)
Δt	: pas de temps	(s)
Δx	: pas d'espace	(m)
ρ	: masse volumique de l'air	(kg.m ⁻³)

Introduction.

Un prototype de séchoir solaire agroalimentaire a été conçu et réalisé par une entreprise régionale : il permet de sécher entre 10 et 20 kg de produit frais en 2 ou 3 jours. Cet appareil peut fonctionner en convection naturelle ou en convection forcée : si le ventilateur est alimenté par photopiles, l'autonomie du séchoir est assurée.

Nous proposons ici une modélisation mathématique de ce séchoir qui permet de simuler son fonctionnement dans les conditions les plus diverses ou bien d'optimiser sa géométrie. L'originalité du travail réside essentiellement dans la manière dont le problème a été appréhendé : le modèle décrit le fonctionnement du séchoir solaire — système macroscopique — en tenant compte des phénomènes qui interviennent au sein de la matière — échelle microscopique.

Ce travail de modélisation est complété par une application à un procédé thermique d'une technique de l'automatique : l'identification paramétrique qui permet lorsque certains paramètres intervenant dans les équations sont malconnus de les identifier à partir de mesures expérimentales.

1. Le séchoir solaire SERESOL : Modèle basculant.

1.1 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT. — C'est un séchoir solaire indirect (Fig. 1), le fruit à sécher étant soumis à un transfert thermique uniquement convectif. Il bénéficie d'une autonomie énergétique (séchoir passif) par son fonctionnement possible en convection naturelle. Un ventilateur alimenté par un

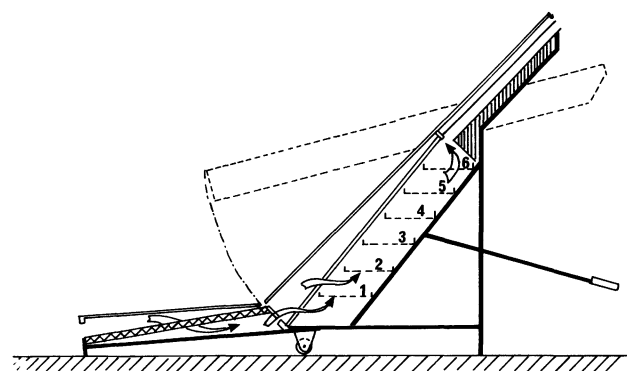


Fig. 1. — Schéma du séchoir solaire SERESOL modèle basculant.

[Schema of solar rocking dryer SERESOL.]

panneau de photopiles lui conserve son autonomie mais en régime forcé.

Il est constitué de 3 parties distinctes [1] :

1) Une partie fixe constituant le caisson de dessiccation composée de six claies horizontales en acier déployé inoxydable (surface totale des claies : $0,16 \text{ m}^2 \times 6 \approx 1 \text{ m}^2$) l'arrière du caisson est isolé par une feuille de polystyrène revêtue d'un film d'aluminium.

2) Une partie basculante destinée à opérer aisément le chargement et le déchargement des claies ; une charnière assure la rotation. Sous la couverture transparente en plaque alvéolaire de polycarbonate on peut distinguer :

— le bas ($0,72 \text{ m}^2$) qui est en fait l'absorbeur du capteur solaire. Réalisé en mousse de polyuréthane émulsionnée (20 pores par inches) il est noirci dans la masse. Lors de la fermeture du séchoir, par rotation vers le bas, l'absorbeur poreux vient coiffer le dessus du caisson de dessiccation : des tendeurs latéraux, en caoutchouc, assurent par pression la bonne étanchéité de l'ensemble.

— le haut ($0,50 \text{ m}^2$) qui joue le rôle de cheminée solaire grâce à la présence d'un absorbeur métallique, recouvert d'une peinture noir mat à dépôt de carbone. Lors de la fermeture du séchoir, le bas de cette cheminée se trouve dans le prolongement de la partie haute du caisson de dessiccation ; la section de passage de l'air est en arrière de l'absorbeur métallique.

3) Dans la partie basse du séchoir est fixé un autre capteur également de type absorbeur poreux, disposé parallèlement au sol servant de préchauffage de l'air ($0,58 \text{ m}^2$).

Un ventilateur placé à l'entrée de ce capteur assure la circulation de l'air dans le séchoir.

1.2 MODÉLISATION DES CAPTEURS SOLAIRES DE TYPE ABSORBEUR POREUX. — Nous avons choisi un modèle simple en ne considérant que les températures moyennes. L'inertie thermique des capteurs est faible donc un modèle écrit en régime permanent, suffit pour représenter ce générateur d'air chaud.

La température de la matrice poreuse est supposée uniforme et l'écoulement de l'air y est considéré unidimensionnel.

L'épaisseur de cette matrice est telle que le rayonnement ne la traverse pas (2 cm).

L'écriture des bilans thermiques au niveau :

- de la couverture vitrée
- de l'air à l'entrée du capteur
- de l'air dans la matrice poreuse
- de la matrice poreuse
- de l'isolant
- de l'air à la sortie du capteur, conduit à un système de 6 équations facilement linéarisables dont

la résolution par une méthode classique de triangulation permet de déduire les valeurs des 6 inconnues, en particulier la valeur de la température de l'air de sortie des capteurs en fonction de la température de l'air à l'entrée et de l'ensoleillement reçu [2].

2. Modélisation du caisson de dessiccation.

2.1 DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE DE SÉCHAGE. —

Depuis les travaux de Sherwood [3] la théorie du phénomène de séchage distingue la succession de 2 phases essentielles, après une brève période de mise en température.

— La phase I est une phase pendant laquelle la vitesse d'évaporation de l'eau interne du produit (ou allure de séchage) est constante. Cette phase correspond à l'élimination de l'eau d'imprégnation faiblement liée à la matière solide — l'eau est libre et la surface du produit est saturée — : c'est un phénomène d'évaporation superficielle sous l'effet de l'écart entre la pression de vapeur d'eau dans une couche mince d'air entourant le produit, et la pression de vapeur d'eau dans l'air de séchage. Cette phase est souvent imperceptible pour de nombreux produits dans les conditions habituelles de séchage.

— La phase II commence à la fin de la période précédente lorsque la teneur en eau moyenne du produit atteint une valeur critique. À partir de cette valeur le front de vaporisation de l'eau commence à régresser vers l'intérieur du produit. Le phénomène prépondérant est alors la diffusion interne de l'eau. La modification de la surface effective de transfert et la résistance rencontrée par la vapeur d'eau dans la couche externe provoquent alors un ralentissement de l'allure de séchage.

Les deux phénomènes physiques intervenant dans chacune des phases (évaporation superficielle et diffusion interne de l'eau) étant de nature différente, nous sommes amenés à proposer un jeu d'équations par phase. Ces deux systèmes ne diffèrent en réalité que par une équation : celle donnant l'expression de la vitesse de séchage.

2.2 ECRITURE DES SYSTÈMES D'ÉQUATIONS DU MODÈLE. — Le caisson de dessiccation est composé de 6 claies superposées (Fig. 2) que l'on peut schématiser comme une succession de 2 boîtiers :

— un boîtier plein contenant le produit à sécher, balayé par l'air.

— un boîtier vide situé dessus, dans lequel s'effectue le mélange de l'air ascendant, sortant du boîtier plein et l'air sec et chaud arrivant latéralement après traversée de l'absorbeur poreux.

C'est ce mélange d'air qui aborde ensuite le boîtier plein de la claie supérieure suivante et ainsi de suite.

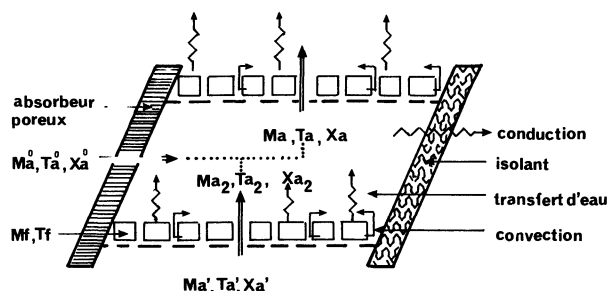


Fig. 2. — Schéma d'une claie constituée d'un boîtier plein et d'un boîtier vide.

[Schema of a tray compound with full box and empty box.]

2.2.1 Hypothèses.

— L'air de séchage

— Au niveau d'une claie, la température, l'humidité et le débit de l'air sont homogènes et uniformes avant et après le mélange. La distribution du débit d'air tout le long de la paroi-capteur du caisson est déterminée en calculant le profil des vitesses d'air à travers l'absorbant poreux [2].

— L'air humide et la vapeur d'eau sont considérés comme des gaz parfaits.

— L'inertie thermique de l'air est négligeable devant celle des fruits.

— Les fruits

— La surface d'échange entre l'air et les fruits reste constante en cours de séchage.

— Tous les fruits d'une même claie, sont à la même température et leur teneur en eau initiale est identique.

— Les échanges

— Les pertes par conduction sont calculées à travers le fond et les côtés du caisson.

— Les échanges par rayonnement avec les fruits peuvent être négligés. En effet d'une part les échanges avec l'absorbant peuvent être estimés à moins de 2 % des apports convectifs, d'autre part les échanges avec le fond, dont la température est très proche de celle des fruits, sont encore plus faibles.

— Les profils internes d'humidité sont supposés identiques pour chaque fruit.

2.2.2 Formulation du modèle. — Un système d'équations est écrit pour chaque phase du séchage, le passage de la phase évaporatoire (I) à la phase diffusionnelle (II) correspond à une activité de l'eau dans le fruit légèrement inférieure à l'unité (par exemple $Aw = 0,99$).

Les équations suivantes découlent des bilans thermiques et massiques établis au niveau d'une seule claie, il en sera de même pour l'ensemble des autres claies.

Nous adoptons les notations suivantes pour décrire l'état de l'air (température, débit et humidité absolue de l'air : T, M, X) à différents niveaux :

— entrée de la couche de fruits : Ta', Ma', Xa'

— sortie de la couche de fruits : Ta_2, Ma_2, Xa_2

— entrée latérale au-dessus des fruits : $Ta^\circ, Ma^\circ, Xa^\circ$

— sortie de la claie après le mélange d'air : Ta, Ma, Xa .

2.2.2.1 Modèle de la phase I ou phase évaporatoire.

— C'est la phase de début de séchage pendant laquelle on enlève l'eau d'imprégnation faiblement liée au produit, et qui donc migre facilement sans rencontrer de résistance à l'intérieur du produit. L'évaporation de l'eau, dans ce cas, est un phénomène de surface, la répartition de la teneur en eau dans le produit reste uniforme. Dans le séchage d'un produit biologique la durée de cette phase est brève devant la phase II. Un séchage lent facilite sa mise en évidence.

— Bilans dans le boîtier plein entre la couche de fruits et l'air de séchage (partie inférieure d'une claie).

Au niveau de l'air de séchage

Bilan thermique :

La variation de la puissance thermique de l'air pendant la traversée de la couche de fruits est égale à la somme des puissances échangées par convection par l'air lors du balayage des fruits, et par conduction à travers la paroi isolante.

$$Ma' \cdot Cp_a (Ta_2 - Ta') = -\alpha_T \cdot S_{ech} \cdot (Ta' - T_f) - ca (Ta' - Te) \quad (1)$$

Bilan massique :

— Conservation de la masse d'air qui traverse la couche de fruits :

$$Ma_2 = Ma' \quad (2)$$

— Conservation de la masse d'eau à la sortie de cette couche.

L'accroissement de la teneur en eau de l'air provient de l'évaporation de l'eau du fruit :

$$Ma' (Xa_2 - Xa') = -\frac{dw}{dt} Ms \quad (3)$$

Au niveau de la couche de fruits

Bilan thermique :

La variation de l'enthalpie des fruits est égale à la somme des puissances échangées par convection avec l'air et des puissances utilisées pour vaporiser l'eau des fruits :

$$Ms(1 + w) Cp_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = \alpha_T (Ta' - T_f) S_{ech} - \Delta H_v \frac{dw}{dt} Ms \quad (4)$$

Bilan massique ou vitesse de séchage :

La variation d'évaporation est réglée essentiellement par l'effet de pompe en surface, dont le terme moteur est exprimé par une différence de pression :

$$\Delta p = P_f(T_f) - P_{va}(X_a) .$$

$$Ms \cdot \frac{dw}{dt} = -\beta_m \times S_{ech} \times \frac{\Delta p}{rv \times Ta'} . \quad (5)$$

— Equation du mélange d'air dans le boîtier vide (partie supérieure d'une claie)

— Conservation des débits massiques d'air sec :

$$Ma = Ma_2 + Ma^\circ . \quad (6)$$

— Conservation des débits massiques d'eau contenue dans l'air :

$$Ma \times Xa = Ma_2 \times Xa_2 + Ma^\circ \times Xa^\circ . \quad (7)$$

— Bilan enthalpique lors du mélange d'air :

L'enthalpie de l'air à la sortie de la claie est égale à la somme des enthalpies des courants d'air ascendant et latéral, diminuée des pertes thermiques à travers la paroi isolante du fond du caisson.

$$Ha = Ha_2 + Ha^\circ - ca(Ta' - Te) . \quad (8)$$

2.2.2.2 Modèle de la phase II ou phase diffusionnelle. — En deçà de la teneur en eau critique du fruit, w_{cri} le phénomène prépondérant est donc la diffusion de l'eau interne.

Le transfert de matière au sein du fruit peut alors être bien représenté par l'équation diffusionnelle de FICK, appliquée à un cylindre.

En effet dans notre cas, une tranche de pomme peut être facilement assimilée à un cylindre dont le séchage ne se fait que par les faces planes, la surface cylindrique (peau) présente une bonne étanchéité au flux d'eau. L'épaisseur de cette tranche est très inférieure à son diamètre.

Donc l'équation générale de transfert de masse peut s'écrire dans le cas où le coefficient Dm ne dépend que de la température du fruit.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = Dm \times \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (9)$$

avec les conditions initiales :

$$w(t_0, x) = w_{cri} \quad (10)$$

et les conditions aux limites aux bords de la tranche :

$$Dm \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=\pm x_0} = \beta_m(w_{surf} - w_e)$$

Une autre condition aux limites peut être déduite de la symétrie de la tranche :

$$\frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 .$$

Ceci permet de réduire de moitié la taille des calculs. En tout instant la teneur en eau, en tout point du fruit est ainsi déterminée en fonction de l'échange convectif en surface.

Si on suppose que dans une couche toutes les tranches de pomme ont une même répartition d'humidité (tranches identiques et de même épaisseur) la valeur moyenne de la teneur en eau de la couche de produit, est obtenue en chaque instant par intégration sur le volume du fruit de la distribution de la teneur en eau interne. Seule cette valeur moyenne est directement mesurable expérimentalement

$$\bar{w} = \frac{1}{V} \int_V w \cdot dV .$$

2.3 DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS APPARAISANT DANS LE MODÈLE.

2.3.1 Echange thermique par convection entre l'air et les fruits. — Les fruits coupés en tranches sont disposés sur les claies.

Pour décrire d'une façon globale l'échange thermique entre l'air et cette couche de fruits, nous avons retenu la corrélation de Lof et Hawlay [4], donnant le coefficient de transfert thermique volumique :

$$\alpha_v = a \left(\frac{Go}{Df} \right)^b .$$

Le coefficient d'échange thermique surfacique α_T est alors déduit simplement en utilisant la relation suivante :

$$\alpha_T = \alpha_v \frac{V_b}{S_{ech}} = \alpha_v \frac{h \cdot S_{cl}}{S_{ech}} .$$

2.3.2 Conductance de l'isolant. — L'échange à travers l'isolant fait intervenir sa conductance ca définie par :

$$ca = \frac{\lambda_i \times S_i}{e_i} .$$

On peut également tenir compte de la convection sur la face extérieure de l'isolant, et utiliser un coefficient global de conductance.

2.3.3 Echange massique entre l'air et les fruits. — L'hypothèse de Lewis est souvent utilisée pour caractériser le rapport du transfert de chaleur à celui de masse en introduisant la fonction de Lewis, $F(Le)$, définie par :

$$F(Le) = \frac{\alpha_T}{\beta_m \cdot \rho \cdot C_{Pf}} .$$

Pour un écoulement de l'air turbulent et des pressions de vapeur négligeables devant la pression totale ; la fonction $F(Le)$ est voisine de l'unité.

Nous poserons $c = F(Le)$ et nous identifierons cette valeur.

— *Pression partielle de vapeur saturante :*
 p_{vs} est exprimée par la formule de J. Bertrand [5] utilisable entre 0 °C et 200 °C.

$$P_{vs} = 10^{\left(17,443 - \frac{2\,795}{T} - 3,868 \log_{10}(T)\right)}$$

avec : P_{vs} en atmosphère

— *Teneur en eau à l'équilibre :*
Nous avons choisi la corrélation proposée par Henderson [6] qui semble bien adaptée aux produits biologiques :

$$W_e = \left[\frac{\text{Log}(1 - HR)}{CH \times T_f} \right]^{1/PH}.$$

CH et PH sont caractéristiques du produit et devront faire l'objet d'une identification expérimentale.

2.4 DÉTERMINATION PAR IDENTIFICATION DES COEFFICIENTS MAL CONNUS. — La méthode d'identification paramétrique, méthode propre à l'automatique est basée sur la minimisation de l'écart quadratique entre les réponses du modèle et celles du processus réel, soumis à la même excitation.

La détermination de cinq paramètres, nécessite l'emploi d'une technique de descente (Powell) :

- trois coefficients apparaissent dans l'expression des coefficients d'échange thermique et massique a , b , c .
- deux dans l'expression de la teneur en eau à l'équilibre : CH et PH .

Les résultats expérimentaux permettant l'identification sont obtenus dans un tunnel de séchage ventilé à atmosphère contrôlée.

Le modèle de séchage utilisé est donc un modèle simplifié puisqu'il n'y a pas de mélange d'air latéral. Les valeurs des coefficients obtenus sont alors :

$$\begin{aligned} a &= 450 & b &= 0,701 & c &= 1,06 \\ CH &= 3 \times 10^{-3} & PH &= 0,789. \end{aligned}$$

Ces valeurs sont caractéristiques du produit (pommes Golden taillées en tranche).

2.5 RÉOLUTION DU MODÈLE ET VALIDATION. — Les systèmes d'équations établies pour chaque phase de séchage sont discrétisés puis résolus par utilisation de la méthode des différences finies.

Les systèmes d'équations doivent donc être doublement indicés pour tenir compte à la fois du temps et du numéro de la claie ; l'équation de transfert de masse à l'intérieur du produit en phase II (équation de diffusion) est triplement indicée, car on doit rajouter la distribution de la teneur en eau à l'intérieur du fruit. D'autre part cette équation de diffusion et ses conditions aux limites sont exprimées en termes de différences finies suivant un schéma explicite ; les dérivées spatiales sont écrites sous forme de différences centrées, les dérivées temporelles sous forme de différences régressives.

La validation du modèle peut alors se faire en comparant les résultats expérimentaux et ceux obtenus par le modèle pour des conditions identiques. L'expérience utilisée doit être différente de celle qui a servi à l'identification des paramètres.

Les résultats présentés sur la figure 3 sont satisfaisants : les écarts décelés restent inférieurs à 2 %.

La courbe présentée concerne les valeurs de perte de masse au cours du temps. La validation aurait très bien pu être faite sur les valeurs des températures de l'air ou des fruits.

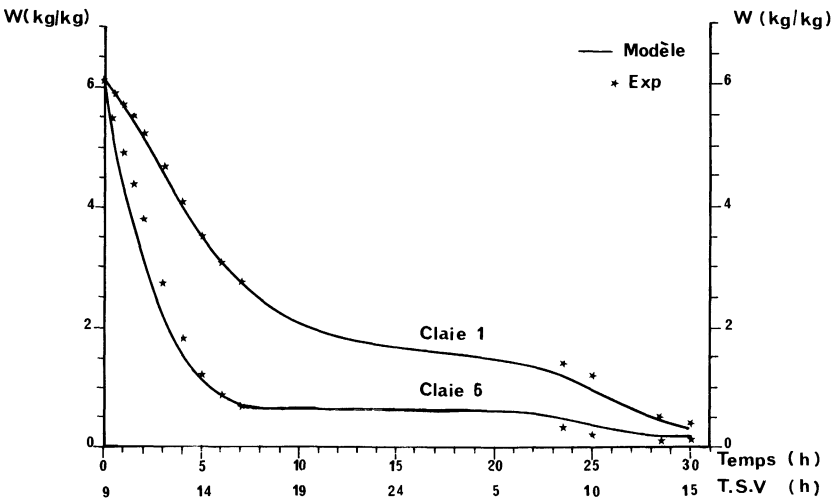


Fig. 3. — Validation du modèle sur une expérience de séchage en tunnel de séchage ventilé.

[The model validation on an apple drying experiment in a ventilated dryer-stove.]

3. Résultats de simulation.

Un programme de simulation est un outil à utilisation multiple. Par exemple il convient parfaitement pour :

— étudier le comportement d'un système réel dans un environnement donné et prédire ses performances ;

— étudier l'influence d'un paramètre sur l'évolution de la réponse du modèle : s'il s'agit d'un paramètre géométrique le *design* de l'appareil pourra être optimisé à moins de frais que lors d'une réalisation expérimentale.

Comme application nous nous limiterons ici à la présentation des résultats de simulation du fonctionnement du séchoir sous deux environnements climatiques différents :

— un climat chaud et sec qui peut être illustré par la région de Perpignan (France) au printemps ;

— un climat chaud et humide, beaucoup plus défavorable à une opération de séchage naturel mais qui justifie bien plus l'utilisation d'un séchoir solaire. Ce climat peut illustrer la réalité par exemple d'Abidjan (Côte d'Ivoire).

Le séchoir est rempli avec 6 kg de pommes Golden coupées en tranches de 1 cm d'épaisseur. La figure 4 simule le déroulement d'une opération de séchage à Perpignan sur quatre jours. Alors qu'en début de séchage la température des fruits est très différente de la température de l'air (jusqu'à 20 °C d'écart), en fin de séchage on remarque une uniformisation de ces températures vers la température de l'air en sortie des capteurs.

D'ailleurs ceci doit être surveillé attentivement car

une montée trop forte en température du produit risque de provoquer une détérioration des fruits en les rendant ainsi inaptes à toute consommation.

Sur les courbes de la figure 5, les pertes de masse obtenues les deux premiers jours d'une opération menée sous les deux climats les plus extrêmes (sec et humide) peuvent être comparées.

On constate dans cette figure 5 que la perte en eau durant la nuit étant de toute façon très faible, il est donc préférable d'arrêter la ventilation et de fermer l'entrée et la sortie du séchoir.

Enfin, si la teneur en eau de l'air est élevée on doit monter plus haut en température pour commencer à sécher. Pendant une journée le produit sèche moins longtemps, la perte de masse est plus faible et la durée totale du séchage est donc plus longue.

Conclusion.

Le modèle mathématique de simulation du fonctionnement du séchoir solaire étudié, a été validé grâce à une expérience de séchage de pommes Golden coupées en tranche. La confrontation des résultats théoriques et expérimentaux est satisfaisante, prouvant ainsi que notre mise en équation des 2 phases successives de ce processus représente bien les 2 phénomènes d'évaporation superficielle (Phase I) et de diffusion interne (Phase II).

La technique d'identification paramétrique mise en œuvre implique des expériences simples, effectuées dans un tunnel de séchage ventilé à atmosphère contrôlée [7].

Pour chaque produit à sécher un jeu de paramètres spécifiques, nécessaires au programme de simulation, est ainsi déterminé.

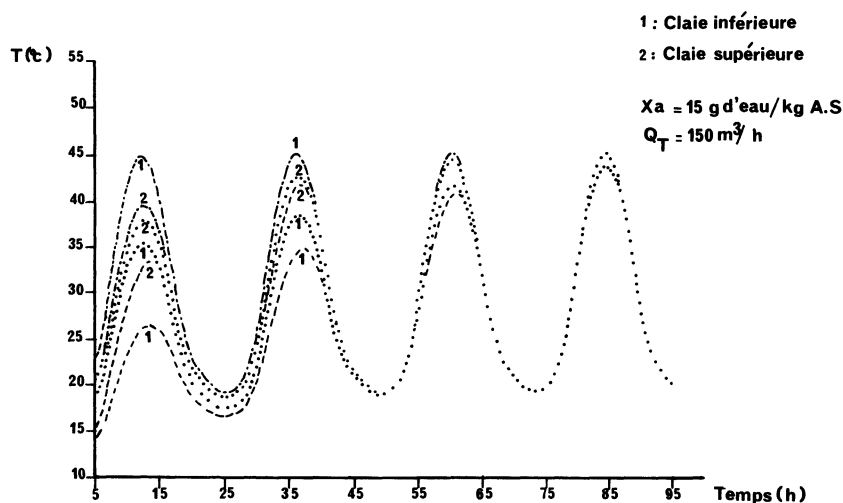


Fig. 4. — Simulation d'une opération de séchage de pommes à Perpignan de durée 4 jours. - - - - Température des fruits ; - - - - Température de l'air à l'entrée de la claie ; Température de l'air à la sortie de la couche de fruits.

[Apple drying simulation on 4 days in Perpignan. - - - - Fruit temperature ; - - - - inlet air temperature ; — outler air temperature.]

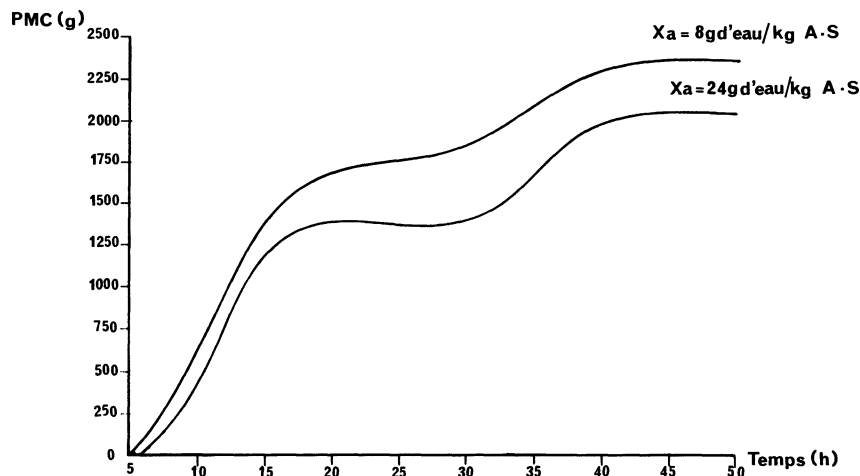


Fig. 5. — Comparaison d'opérations de séchage de deux jours simulées à Perpignan et à Abidjan. Perte de masse cumulée pour un chargement de 6 kg de produit frais.

[Comparison of two drying simulation during 2 days in Perpignan and Abidjan. Cumulated loss mass of the fruits for a 6 kg loading.]

Le modèle permet alors de simuler le séchage d'un produit dans des conditions climatiques diverses.

La modélisation de ce séchoir en convection naturelle reste à faire : dans ce type de fonctionnement seul est modifié le débit d'air qui n'est plus fixe mais dépend de sa température et de son humidité à l'entrée et à la sortie du séchoir.

Le modèle présenté ici, valable à tout débit, est donc applicable et permettra le calcul des valeurs caractéristiques du séchage (température, teneur en eau de l'air ou des fruits) avec la valeur du débit d'air recalculée à chaque instant.

L'optimisation des paramètres géométriques ou de fonctionnement (débit d'air) peut aussi être un objectif de ce travail.

Bibliographie

- [1] FOURNIER, M., THEMELIN, A., Expérimentation de séchoirs solaires à fruits de faible capacité : les modèles SERESOL et M5003, Séchage solaire et développement rural, ENSAM-Bordeaux (1983) pp. 105-121.
- [2] EL HISSE, M., Modélisation et simulation d'un séchoir solaire agroalimentaire, Thèse 3^e cycle, Perpignan (1987).
- [3] SHERWOOD, T. K., Drying of solids, *Ind. Eng. Chem.* **21** (1929) p. 12-16 ; **21** (1929) p. 976-980 ; **22** (1930) p. 132-137 ; **24** (1934) p. 307-310.
- [4] LOF, G.O.G., HAWLEY, R. W., Unsteady state heat transfer between air and loose solids, *Ind. Eng. Chem.* **40** (1948) p. 106.
- [5] BRUHAT, G., Thermodynamique (Masson, Paris) 1968.
- [6] HENDERSON, S. M., A basic concept of equilibrium moisture, *Agricultural Engineering* (1952) **33** p. 29-32.
- [7] PALLET, D., FOURNIER, M., THEMELIN, A., Modélisation, identification et simulation d'un séchoir solaire à bois, *Revue Phys. Appl.* **22** (1987) p. 1399-1409.