

Etude d'une commande optimale pour le séchage par rayonnement infrarouge d'un polymère en solution aqueuse

Nadine ALLANIC, Patrick SALAGNAC*, Patrick GLOUANNEC

Laboratoire d'Etudes Thermiques, Energétiques et Environnement (LET2E),
UBS, Centre de recherche, rue Saint-Maudé, B.P. 92116, 56321 Lorient Cedex, France

* (auteur correspondant : patrick.salagnac@univ-ubs.fr)

Résumé – Cette étude concerne le séchage d'un polymère (l'alcool polyvinylique) en solution aqueuse par convection et par rayonnements électromagnétiques de type infrarouge. A partir d'un modèle de connaissance du comportement thermo-hydrigue du produit, une approche de type « commande optimale » basée sur la minimisation d'une fonctionnelle prenant en compte des critères au niveau du procédé (temps de séchage, coût énergétique) et des contraintes sur le produit (température, teneur en eau) est développée. L'éclairage infrarouge est déterminé hors ligne puis testé expérimentalement. Les résultats sont confrontés à une régulation de type proportionnel.

Nomenclature

C_p	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	T	température, K
D	coefficient de diffusion, $m^2.s^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
e	épaisseur, m	ε	émissivité
F_m	flux masse évaporé, $kg.m^{-2}.s^{-1}$	σ	constante de Stephan-Boltzmann
h_c	coefficient de convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
L_v	chaleur latente de vaporisation, $J.kg^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
R	constante des gaz parfait, $J.mol^{-1}.K^{-1}$	<i>enc</i>	enceinte
t	temps, s	b	boîte
X	teneur en eau en base sèche		

1. Introduction

Si les mécanismes fondamentaux rencontrés dans les procédés traditionnels de séchage ont fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux et théoriques, l'optimisation des procédés reste une préoccupation relativement récente. Plusieurs objectifs peuvent être fixés, les principaux étant de réduire le temps de séchage, diminuer les coûts énergétiques ou encore améliorer la qualité finale du produit [1, 2]. Dufour [3] qui a publié récemment un état de l'art des différentes méthodes de contrôle/commande des procédés de séchage constate que la plupart se font encore aujourd'hui par le biais d'une régulation.

Dans le cadre de cette communication une stratégie de contrôle par commande optimale est développée. L'objectif est d'optimiser le séchage d'un polymère (l'alcool polyvinylique) en solution aqueuse placé dans une boîte de Pétri en polystyrène de 90 mm de diamètre. Le produit a une teneur en eau initiale en base sèche de $7,5 kg.kg^{-1}$. 8 ml de solution sont introduits dans la boîte ce qui correspond à une épaisseur initiale de 1,3 mm. Au final, ce doit être un film uniformément réparti dans le fond de la boîte avec une teneur en eau moyenne inférieure à $1 kg.kg^{-1}$.

Les études expérimentales et numériques précédemment menées [4,5] ont montré, l'intérêt d'un séchage combinant la convection au rayonnement infrarouge pour obtenir des temps de

séchage courts, et d'autre part, la nécessité de bien maîtriser les apports énergétiques pour éviter une détérioration du produit et limiter des phénomènes d'assèchement superficiel.

La méthode retenue consiste à déterminer l'éclairement infrarouge hors ligne. Après avoir défini le principe d'un contrôle par loi de commande, les objectifs en terme de temps de séchage, de consommation énergétique et de qualité du produit sont définis. Le modèle de connaissance permettant de décrire le comportement thermohydrique du polymère est ensuite décrit. Enfin, des résultats d'optimisation sont présentés. Les lois de commande déterminées en régulant la température du produit et en utilisant l'approche par commande optimale sont confrontées et testées expérimentalement.

2. Commande optimale

Déterminer la commande optimale d'un processus [1, 2, 6] consiste à déterminer celle qui permet de minimiser un critère lié aux variables d'état ou aux commande du système et qui traduit les objectifs à atteindre, tout en respectant des contraintes technologiques, des conditions initiales ou finales. Pour cela, le processus est décrit par un modèle et un algorithme d'optimisation est utilisé pour minimiser le critère.

Dans cette étude, le problème de contrôle formulé consiste à déterminer une loi de commande des émetteurs infrarouges permettant de respecter des critères sur le procédé (temps de séchage, coût énergétique) et des contraintes sur le produit (température, teneur en eau).

Afin d'influencer sur le temps de séchage, on définit un critère faisant intervenir l'écart quadratique entre la température de produit et une température de consigne ($T_{cons} = 85^{\circ}\text{C}$) :

$$J_A = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left[\frac{T(t) - T_{cons}}{T_{cons}} \right]^2 dt \quad (1)$$

En ce qui concerne la consommation d'énergie, le terme suivant est mis en oeuvre :

$$J_B = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left[\frac{P_{IR}}{P_0} \right]^2 dt \quad (2)$$

avec P_0 la densité de flux infrarouge maximale.

Les essais de séchage effectués sur le produit ont montré que lorsque la sollicitation thermique apportée est importante, des stries et des plis limitant le transfert de masse se forment en surface [4]. Celle-ci est rapidement asséchée bien qu'il reste de l'eau au sein du produit. Il est alors difficile de sécher le produit en dessous d'une teneur en eau moyenne de 1 kg.kg^{-1} . Aussi, un critère est introduit de façon à ne pas atteindre des teneurs en eau trop faibles en surface. Celui-ci prend en compte la vitesse de variation de la teneur en eau, soit :

$$J_C = \frac{1}{2} \max^2 \left(\frac{\partial X(t)}{\partial t} \right)_{surf} \quad (3)$$

L'objectif final est d'obtenir la densité de flux infrarouge correspondant à un compromis entre ces trois critères par la minimisation de la fonction objectif suivante :

$$J(P_{IR}) = AJ_A + BJ_B + CJ_C \quad (4)$$

avec A , B et C des coefficients de pondération.

De plus, pour des raisons technologiques, des contraintes sur valeur maximale (P_0) et sur la variation $\left(\frac{dP_{IR}}{dt} \right)$ de l'éclairement infrarouge sont imposées.

3. Modèle

La détermination de l'éclairement infrarouge nécessite de disposer d'un modèle représentatif de l'évolution de la teneur en eau et de la température au sein du produit en fonction des sollicitations (température, vitesse, hygrométrie de l'air et éclairement infrarouge). Le modèle développé dans le cadre de ce travail est détaillé dans les références [4,5] et est donc ici succinctement présenté. L'ensemble des transferts de masse et de chaleur ainsi que les conditions aux limites sont données sur la figure 1. Les transferts de masse sont supposés unidimensionnels. L'évaporation n'a lieu qu'en surface. L'élimination de l'eau se traduit par un retrait linéaire (ψ) du produit. De ce fait, l'équation de diffusion de l'eau s'exprime dans un repère fixe lié au produit sec (coordonnée Lagrangienne, $0 < \xi < e_{sec}$) [3] :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{D(X,T)}{(1+\psi X)^2} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) \quad (5)$$

L'expression retenue pour le coefficient de diffusion D est la suivante :

$$D(X,T) = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} e^{-\frac{a}{X}} \quad (6)$$

avec D_0 , E_a et a des constantes déterminées par méthode inverse [5,8].

En ce qui concerne l'évolution des températures, les études précédentes [2] ont montré que la température au sein du produit peut être considérée comme homogène. En notant ϕ_b le flux de chaleur à l'interface boîte/produit, le bilan énergétique s'écrit :

$$\left(\rho C_p e \right) \frac{\partial T}{\partial t} = h_c (T_{air} - T) - F_m L_v + \varepsilon \sigma (T_{enc}^4 - T^4) + \phi_b + P_{abs} \quad (7)$$

La densité de flux infrarouge absorbée par le produit (P_{abs}) est fonction des apports infrarouges (P_{IR}), du coefficient de réflexion et du coefficient d'absorption du produit [4,5]. L'activité et les propriétés thermophysiques (ρ , C_p , coefficient d'absorption infrarouge, ...) introduites dans le modèle ont été déterminées expérimentalement ou déduites de cinétiques de séchage [4,5]. Au sein de la boîte, seuls les transferts de chaleur par conduction et l'apport par rayonnement infrarouge sont pris en compte.

L'équation de la chaleur au sein de la boîte ainsi que l'équation (5) sont discrétisées spatialement par la méthode des volumes finis. La résolution temporelle se fait par une méthode de type prédicteur-correcteur. La non-linéarité et le couplage des équations sont résolus par une méthode de Newton.

4. Résultats

Une première approche a été faite par une commande de type proportionnel afin d'approcher le temps de séchage minimum. Dans une seconde étape, des résultats obtenus par commande optimale sont présentés. Les conditions aérauliques (température, vitesse et humidité de l'air) sont fixées ($T_{air} = 35^\circ\text{C}$, $v_{air} = 2.8 \text{ m.s}^{-1}$, $H_{air} = 20\%$) et on s'intéresse uniquement au calcul hors-ligne de la densité de flux infrarouge P_{IR} .

4.1. Commande de type proportionnel

Dans cette approche, la température du produit est assujettie à une température de consigne par le biais d'une régulation de type proportionnel. La valeur de consigne a été fixée à une

température légèrement inférieure à la température de déformation de la boîte soit $T_{cons} = 88^\circ\text{C}$. Dans ce cas, l'éclairement infrarouge est déterminé en considérant :

$$\begin{cases} P_{IR} = P_0 [K\varepsilon(t) + u] & \text{avec } \varepsilon(t) = T_{cons} - T(t) \\ \text{si } P_{IR} < 0 & \text{alors } P_{IR} = 0 \\ \text{si } P_{IR} > P_0 & \text{alors } P_{IR} = P_0 \end{cases} \quad (8)$$

Les valeurs du gain du régulateur (K) et de la constante (u) sont déterminées de façon à obtenir une réponse stable sans dépassements de la consigne et avec un faible écart de statisme. Le modèle est utilisé avec 50 nœuds de calculs dans le produit et 5 nœuds dans la boîte. Du fait de la forte non-linéarité et du couplage des équations, il est nécessaire d'introduire un faible pas de temps initial (0,05 s). Les valeurs de l'éclairement infrarouge sont calculées avec un pas de temps de 10 secondes.

La figure 2 présente l'évolution de la densité de flux infrarouge et de la température pour $P_0 = 12 \text{ kW.m}^{-2}$. On peut distinguer trois phases. Tout d'abord, un palier qui correspond à la valeur maximale P_0 pendant lequel la montée en température est très rapide. Puis, lorsque le produit atteint une température proche de 80°C , l'éclairement infrarouge diminue progressivement. Au final, la température se stabilise à une température de 85°C pour une valeur d'éclairement infrarouge d'environ 5 kW.m^{-2} . La température reste ainsi inférieure à la température de consigne. La figure 3 montre que bien que la densité de flux infrarouge soit encore maximale à 400s, la surface est déjà presque sèche ($X_{surf} = 0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$) et que de forts écarts de teneurs en eau existent au sein du produit. En effet, à cet instant, la teneur en eau simulée au fond de la boîte est encore supérieure à 5 kg.kg^{-1} . De plus, dans cet essai, le temps de séchage, pour une teneur en eau moyenne de 1 kg.kg^{-1} , est de 10 min.

L'éclairement infrarouge ainsi déterminé a été testé sur un pilote de séchage. Celui-ci [4, 5] permet d'acquérir l'évolution de la masse en fonction du temps. La température de surface (T_{surf}) est donnée par un pyromètre et celle de la boîte (T_b) par un thermocouple. Les résultats expérimentaux sont confrontés aux cinétiques obtenues par simulation pour les mêmes conditions sur la figure 4. L'évolution de la teneur en eau est bien représentée. Même si le modèle surestime la température entre 100 s et 600 s, l'évolution de la température est globalement bien représentée.

L'utilisation d'une commande proportionnelle permet donc d'obtenir un temps de séchage satisfaisant tout en respectant une contrainte sur la température du produit.

4.2. Commande de type optimal

Afin de trouver un juste compromis entre le temps de séchage, la consommation énergétique et la qualité du produit, la commande optimale s'avère intéressante. La minimisation du critère retenu est effectuée par l'algorithme de Levenberg-Marquardt [4]. Pour pouvoir mettre en place une procédure d'optimisation efficace, il est important de limiter le temps de calcul du modèle. Dans cet objectif, le nombre de nœuds dans le produit est réduit à 25 ce qui permet d'obtenir un temps de calcul d'environ 4 s. Le pas de temps initial pour la résolution du problème direct est de 0,05 s. La densité de flux infrarouge est déterminée avec un pas de temps de 50 secondes et est interpolée par splines cubiques toutes les 10 secondes.

Les contraintes introduites sur la densité de flux et sur sa dérivée sont alors les suivantes :

$$0 < \frac{dP_{IR}}{dt} < 500 \text{ kW.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \text{ et } 0 \leq P_{IR} \leq P_0 \text{ avec } P_0 = 16 \text{ kW.m}^{-2} \quad (8)$$

Différents tests préliminaires ont été réalisés, notamment en modifiant la valeur initiale de la densité de flux. Ceux-ci ont montrés que l'introduction de contraintes correspondantes à une réalité physique facilite la convergence du calcul et permet d'assurer la robustesse de l'algorithme. La figure 5 donne l'évolution calculée des densités de flux obtenues avec différents coefficients de pondération. Lorsque la fonction objectif compte que du temps de séchage ($B = 0$ et $C = 0$), celui-ci est de 9 min. Si un critère sur la consommation d'énergie est introduit, l'algorithme tend alors vers une densité de flux infrarouge plus faible. Dans le cas où $A = 0,75 / B = 0,25 / C = 0$, même si le coefficient de pondération sur la consommation d'énergie est relativement faible, le gain d'énergie est d'environ 12%. En contre partie le temps de séchage a augmenté (12 min). L'éclairement infrarouge a tendance à être limité lorsque le critère sur la diminution de la teneur en eau superficielle est introduit ce qui permet de limiter la formation de stries à la surface du produit. A titre d'exemple, la figure 6 montre que si $A = 1 / B = 0 / C = 20000$, la teneur en eau en surface chute plus lentement ce qui signifie que l'assèchement superficiel est réduit. Enfin, le dernier test réalisé pour $A = 0,75 / B = 0,25 / C = 20000$ montre la faisabilité de la méthode qui permet de prendre en compte à la fois la consommation énergétique et le critère de qualité.

Afin d'évaluer l'impact réel sur la qualité finale du produit, la loi de commande optimale déterminée pour $A = 1 / B = 0 / C = 20000$ a été testée expérimentalement. Les résultats expérimentaux et simulés sont en bon accord (Figure 7). Durant cet essai, la boîte de pétri n'a pas subi de déformation. Comparer aux études expérimentales précédemment réalisées [2], les stries apparaissent plus tard et sont plus petites. De ce fait, elles ne limitent pas le transfert de masse et la teneur en eau finale du produit atteint $0,2 \text{ kg.kg}^{-1}$.

5. Conclusion

En conclusion, le contrôle optimal est une méthode efficace qui permet de chercher un compromis entre plusieurs objectifs contradictoires. Cette étude a montré l'importance du choix des coefficients de pondération. Les résultats expérimentaux ont montré les possibilités et les limites de cette démarche. En effet, s'il est possible de réduire le temps de séchage sans déformer la boîte de Pétri tout en limitant l'énergie consommée, l'amélioration de la qualité finale du produit est d'autant plus difficile à obtenir qu'elle est difficile à traduire comme critère. Une perspective intéressante sera de développer une commande en ligne de façon à prendre en compte les conditions réelles et les perturbations du système.

Références

- [1] P.E. Price, J.R. Richard A. Cairncross, Optimization of single-zone drying of polymer solution coatings using mathematical modeling, *Journal of Applied Polymer Science*, 78 (2000), 149-165.
- [2] J.C. Ho, S.K. Chou, A.S. Mujumdar, M.N.A. Hawlader, K.J. Chua, An optimisation framework for drying of heat-sensitive products, *Applied Thermal Engineering*, 21 (2001), 1779-1798.
- [3] P. Dufour, Control engineering in drying technology: Review and trends, *Drying Technology*, 24 (2006), 889-904.
- [4] N. Allanic, P. Salagnac, P. Glouannec, Convective and radiant drying of a polymer aqueous, *Heat and Mass Transfers*, (2006) on line DOI : 10.1007/s00231-006-0196-5.
- [5] N. Allanic, Optimisation sous contraintes d'une opération de séchage combinant la convection et les technologies rayonnantes infrarouges - Application à un polymère en solution aqueuse, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, Lorient, 2006.
- [6] P. Borne, F. Rotella, Commande optimale, *Techniques de l'ingénieur*, R 7427 (1996).
- [7] P. Navarri, J. Andrieu, High-intensity infrared drying study. Part II. Case of thin coated films, *Chemical Engineering and Processing*, 32 (1993), 319-325.

[8] N. Allanic, P. Salagnac, P. Glouannec, Estimation of diffusion coefficient in drying of polymer aqueous solution, *15th International Drying Symposium*, Series Editor: AS Mujumdar, Vol. C (2006), 1836-1843.

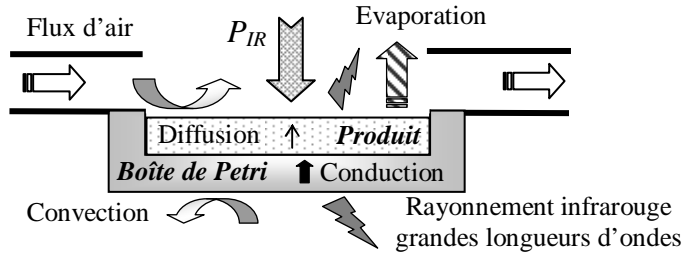


Figure 1 : Transferts de masse et de chaleur.

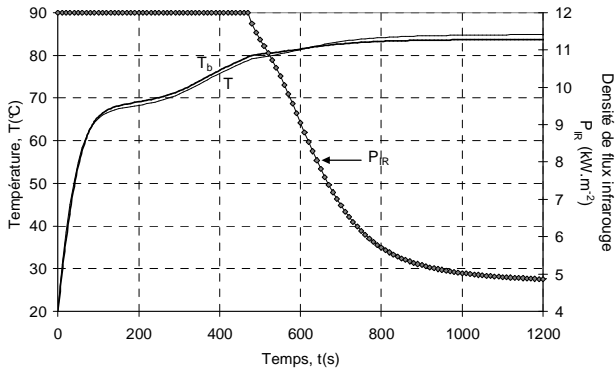


Figure 2 : Calcul de P_{IR} par une commande de type proportionnel ($P_0 = 12 \text{ kW.m}^{-2}$).

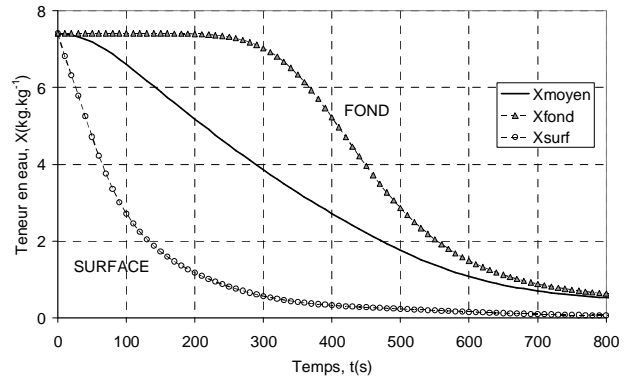


Figure 3 : Champs de teneurs en eau.

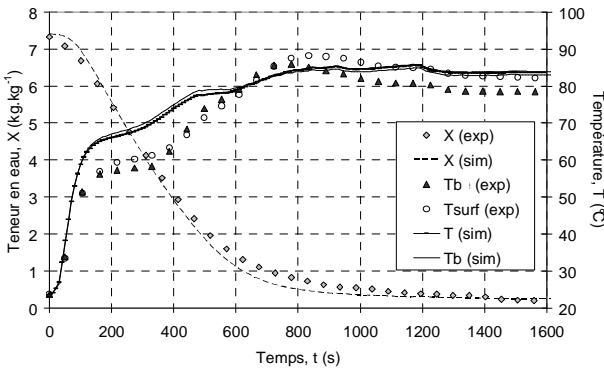


Figure 4 : Confrontation simulation-expérience en commande proportionnelle.

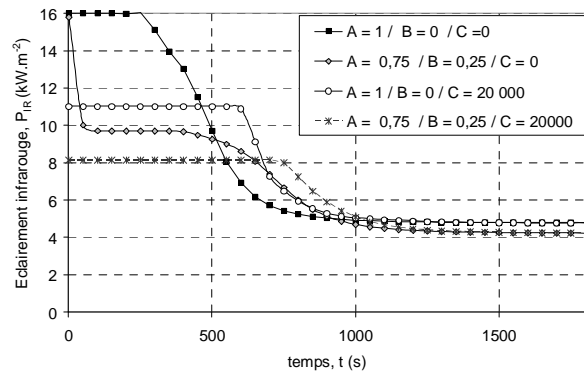


Figure 5 : Loi de commande optimale pour différents coefficients de pondération.

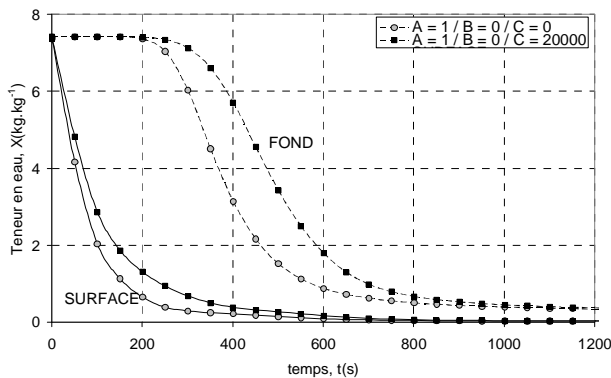


Figure 6 : Evolution des teneurs en eau en surface et au fond de la boîte.

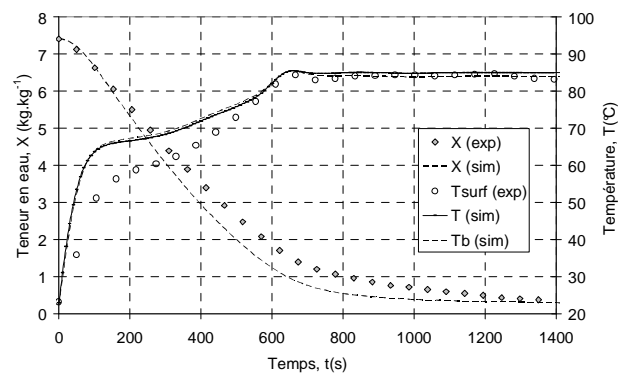


Figure 7 : Confrontation simulation-expérience en commande optimale.