

**This document must be cited according to its final version
which is published in a conference proceeding as:
B. Da Silva¹, I. Bombard¹, P. Dufour¹, P. Laurent¹,
« Etude expérimentale de la robustesse d'une commande prédictive d'un
procédé de cuisson sous infrarouge de peintures en poudre »,
Société Française de Thermique (SFT), paper 53
Vannes, France, may 26-29 2009**

**All open archive documents of Pascal Dufour are available at:
<http://hal.archives-ouvertes.fr/DUFOUR-PASCAL-C-3926-2008>**

**The professional web page (Fr/En) of Pascal Dufour is:
<http://www.lagep.univ-lyon1.fr/signatures/dufour.pascal>**

1

Université de Lyon, Lyon, F-69003, France; Université Lyon 1;
CNRS UMR 5007 LAGEP (Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés),
43 bd du 11 novembre, 69100 Villeurbanne, France
Tel +33 (0) 4 72 43 18 45 - Fax +33 (0) 4 72 43 16 99
<http://www-lagep.univ-lyon1.fr/> <http://www.univ-lyon1.fr> <http://www.cnrs.fr>

Étude expérimentale de la robustesse d'une commande prédictive d'un procédé de cuisson sous infrarouge de peintures en poudre

Bruno da Silva, Isabelle Bombard, Pascal Dufour*, Pierre Laurent

Université de Lyon, Lyon, F-69003, France; Université Lyon 1; CNRS UMR 5007 LAGEP (Laboratoire d'Automatique et de GÉNIE des Procédés), 43 bd du 11 novembre, 69100 Villeurbanne, France ;

*(auteur correspondant : dufour@lagep.univ-lyon1.fr)

Résumé - L'objectif de ce travail est de montrer la robustesse d'une loi de commande prédictive en temps réel d'un procédé de cuisson de peintures en poudre sur un support plan et métallique sous infrarouge. En dépit d'un modèle de connaissance non parfait dû à des propriétés radiatives (statique et dynamique) de l'émetteur complexes à modéliser et à mesurer en ligne, cette commande en boucle fermée permet de contrôler expérimentalement l'état du feuil de peinture qui est étroitement lié à la maîtrise de l'évolution des températures pendant la cuisson, en particulier au sein de la couche de peinture.

Nomenclature

j	index discret du temps futur,	y	variable de consigne ou de sortie,
J	critère de performance,	<i>Indices</i>	
k	index discret du temps présent,	$const$	contraint,
N_p	horizon de prédiction,	m	signal pour le modèle,
N_k	nombre d'échantillons,	p	signal pour le procédé,
t	variable de temps continue,	ref	signal pour la référence.
u	variable de commande,		

1. Introduction

L'objectif de ce travail est de montrer que la commande prédictive à modèle interne permet de commander en ligne un procédé de cuisson de peintures en poudre sous infrarouge, et ce malgré des incertitudes sur un des paramètres principaux du procédé, l'absorption du rayonnement infrarouge. Cette étude a été conduite pour deux couleurs de peinture (blanc et noir) et pour différents horizons de prédiction (le paramètre de réglage principal dans la commande prédictive). Le modèle utilisé dans la structure de commande est un modèle de connaissances, aux équations à dérivées partielles et à commande frontière, régi par les lois des transferts de chaleur et développé pour décrire l'évolution en température et en degré de réticulation en tout point de la couche de peinture [1]. Dans ce système, les paramètres importants sur le comportement du film de peintures sont en particulier les aspects radiatifs du système, à savoir le comportement vis-à-vis du flux infrarouge de la peinture (la variable de commande manipulée en ligne) et la variation du spectre d'émission des émetteurs en fonction de leur tension d'alimentation. La commande en ligne est nécessaire, car le comportement du coefficient d'absorption de la peinture vis-à-vis des émetteurs infrarouges (en fonction de leur tension d'alimentation) est fortement variable, difficilement modélisable, et conduit à une importante variation de température : une incertitude de +/- 20% sur le

coefficient d'absorption implique une erreur de 20°C sur la température [1]. Cette étude est la suite des résultats présentés lors du congrès SFT 2008 [2].

2. Commande prédictive à modèle interne

La commande prédictive à modèle interne est une commande très présente dans l'industrie et dans de nombreux domaines d'applications [3]. La commande prédictive, avec une connaissance du modèle (qui peut être incomplète), envisage le comportement du procédé dans le futur en fonction des objectifs à atteindre. La stratégie de mise en œuvre de la commande prédictive s'articule autour de quatre points clés :

1. un critère d'optimisation traduisant l'objectif de fonctionnement souhaité du procédé et éventuellement les différentes phases pour y parvenir,
2. des caractéristiques de fonctionnement sur les actionneurs et les sorties qui engendrent des contraintes,
3. un modèle mathématique de prédiction du comportement du procédé à commander,
4. une méthode de résolution du problème d'optimisation qui à partir de l'écart entre le comportement constaté et celui voulu, va trouver la commande future à appliquer pour atteindre l'objectif établi.

De précédentes études [2,4] ont montrés que la commande prédictive à modèle interne et la structure de commande retenue étaient bien adaptées à la cuisson sous infrarouge de peintures en poudre. Le détail de la démarche retenue pour cette étude et les comparaisons avec une commande proportionnelle intégrale dérivée (PID) sont détaillées dans [4].

2.1. Structure de commande utilisée

Dans notre étude, l'algorithme [5] utilise un modèle d'équations aux dérivées partielles linéaire temps variant. L'idée consiste à supposer que la variation vers un comportement voulu peut être décrite par une linéarisation du modèle initial autour d'un fonctionnement nominal. La commande est un problème d'optimisation sur un horizon glissant N_p ou le critère de performance (J_{tot}) intègre l'écart à la trajectoire de référence (J), et peut aussi prendre en compte d'autres contraintes, dites externes (J_{ext}), telles que les caractéristiques physiques et limitations du procédé :

$$\min J_{tot}(u) = J(u) + J_{ext}(u) \quad (1)$$

$$J_{tot}(u) = \sum_{j=k+1}^{j=k+N_p} f(y_{ref}(j), y_p(k), y_m(k), u) \quad (2)$$

2.2. Logiciel de commande : MPC@CB¹

Le logiciel de commande utilisé MPC@CB est développé sous Matlab. Il peut être facilement utilisé pour le contrôle de procédé dont la dynamique est régie par des équations aux dérivées partielles, des équations aux dérivées ordinaires, non linéaires ou linéaires.

Ce logiciel permet la résolution de nombreux problèmes de commande basée sur un modèle :

¹ © Université Claude Bernard Lyon 1 – EZUS. Pour utiliser MPC@CB, merci de contacter son auteur : dufour@lagep.univ-lyon1.fr

- commande prédictive pour un problème de poursuite de trajectoire, avec ou sans contraintes de sortie,
- commande prédictive pour un problème de minimisation du temps avec ou sans contraintes de sortie,
- le procédé simulé et le modèle peuvent être décrits par le même ou un jeu différent d'équations et/ou de paramètres,
- commande prédictive en simulation ou en temps réel d'un procédé pilote.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Montage expérimental

Dans le cas de nos peintures, l'actionneur est représenté par la puissance de l'émetteur infrarouge, alors que la sortie est la mesure de la température du support métallique. Le dispositif expérimental a été présenté en détail lors de précédents travaux [2]. Pratiquement, la température de la couche de peinture peut ensuite être reconstruite au moyen d'un modèle de cuisson tandis que l'évolution de l'avancement de la réaction de polymérisation est calculée avec un modèle cinétique.

A partir de mesures expérimentales du coefficient d'absorption (en fonction de la température des peintures), nous avons ici étudié le comportement de la commande et notamment sa robustesse vis-à-vis de ce paramètre (celui-ci dépendant de la commande, et cette variation n'étant pas pris en compte ni dans le modèle ni dans la loi de commande).

3.2. Conditions expérimentales

Cette étude a été conduite pour deux couleurs de peinture : blanc et noir, et pour différents horizons de prédiction. Le modèle de comportement thermique de l'ensemble peinture et support utilise comme paramètre principal le coefficient d'absorption infrarouge ; pratiquement ce coefficient dépend de la température de la surface mais aussi de la puissance de l'émetteur (au travers de la longueur d'onde d'émission) et varie au cours de la cuisson [6]. Nous avons cependant retenu les valeurs constantes du tableau 1 mesurées pour la peinture blanche et la peinture noire (pour un émetteur à pleine puissance fonctionnant comme un corps noir, nous ne disposons pas d'étude du comportement radiatif de l'émetteur en dynamique [4]), le modèle moyen utilisant la moyenne des deux valeurs précédentes. Ceci représente l'incertitude paramétrique principale dont l'impact doit être atténué par la loi de commande en boucle fermée.

Modèle de peinture noire	Modèle de peinture blanche	Modèle moyen
0.95 (-)	0.55 (-)	0.75 (-)

Tableau 1 : Réglage du coefficient d'absorption

La variable mesurée est la température mesurée sous l'échantillon, où une incertitude de 1K est considérée. La variable manipulée est le flux infrarouge calculé par l'algorithme de commande. La période d'échantillonnage est de 1s.

La sortie du procédé doit poursuivre une référence temps variant connue et fixée à l'avance : la trajectoire de température $y_{ref}(t)$. Afin d'évaluer la capacité du contrôleur à respecter des contraintes externes elles aussi spécifiées, la sortie du procédé $y_p(t)$ ne doit pas dépasser une valeur maximale (arbitraire) :

$$y_p(t) \leq 450K \quad (3)$$

Le flux infrarouge déterminé par le contrôleur doit respecter les contraintes physiques sur l'amplitude et la vitesse de variation du flux infrarouge :

$$\begin{cases} 0 \text{ W.m}^{-2} \leq u(t) \leq 23500 \text{ W.m}^{-2} \\ -10000 \text{ W.m}^{-2} \text{.s}^{-1} \leq \frac{du(t)}{dt} \leq 10000 \text{ W.m}^{-2} \text{.s}^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

3.3. Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus avec les deux types de peintures noire et blanche sont présentés. Pour les deux peintures, l'influence du choix de l'horizon de prédiction ainsi que le réglage du coefficient d'absorption sont présentés. Pour comparer ces résultats, nous avons utilisé la racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) calculée sur toute la durée de l'expérience :

- La REQM de la poursuite de trajectoire (REQM_P) qui représente la REQM entre la référence contrainte et la sortie du procédé,
- La REQM du modèle (REQM_M) qui représente la REQM entre la sortie du procédé et la sortie du modèle.

$$\begin{cases} REQM_P = \sum_{k=1}^{k=N_k} \left(\sqrt{\frac{(y_{ref_const}(k) - y_p(k))^2}{N_k}} \right) \\ REQM_M = \sum_{k=1}^{k=N_k} \left(\sqrt{\frac{(y_p(k) - y_m(k))^2}{N_k}} \right) \end{cases} \quad (5)$$

3.3.1. Peinture noire

Une série d'expériences a été réalisée sur la peinture noire (Figure 1). La figure 2 représente la poursuite de trajectoire contrainte avec 14 pour horizon de prédiction et avec le coefficient d'absorption de la peinture blanche pour paramètre du modèle (REQM_P = 5K). La poursuite de trajectoire s'effectue correctement en dépassant légèrement la contrainte imposée à la trajectoire.

La figure 1 montre que la valeur du coefficient d'absorption utilisée dans le modèle n'influence que très faiblement la qualité de la poursuite (REQM_P), même si l'erreur de modélisation (REQM_M), est plus importante avec le modèle de peinture noire pour paramètre du modèle. Par ailleurs, on note une certaine convexité dans le réglage de l'horizon de prédiction (N_p=12 ou 14) quelque soit le coefficient d'absorption. En raison des incertitudes, la différence entre la sortie du procédé et la sortie du modèle utilisée par la commande augmente la REQM_M de 15-20K pour le modèle moyen ou de peinture blanche, à 40-45K pour le modèle de peinture noire. En revanche, la REQM_P passe de 3-4K pour le modèle de peinture blanche, à 4-5K pour le modèle de peinture noire. L'influence de la variabilité du

coefficient d'absorption est donc limitée par la commande en boucle fermée, et ce devant l'incertitude de mesure proche de 1K.

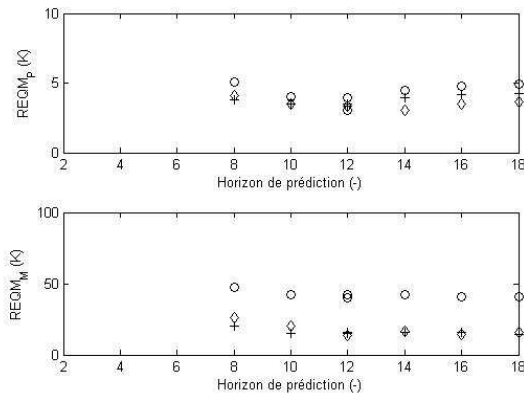


Figure 1: Peinture noire, influence du modèle sur les REQM : o (noir), + (blanc), losange (moyen)

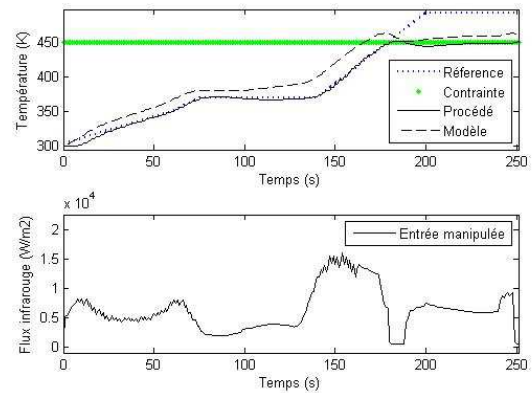


Figure 2 : Peinture noire, exemple de résultats de poursuite, et commande appliquée

3.3.2. Peinture blanche

Une série d'expériences a également été réalisée pour la peinture blanche (Figure 3). Concernant le suivi de trajectoire, les meilleurs résultats (Figure 4) ont été obtenus pour le coefficient d'absorption correspondant à la peinture blanche pour un horizon de prédiction de 12, correspondant à la $REQM_p = 3K$. Pour les trois modèles, on retrouve là aussi une convexité dans le réglage de l'horizon de prédiction, $N_p=10$ ou 12 assure des résultats satisfaisants. Si l'horizon de prédiction est trop petit, la connaissance du comportement dynamique n'est pas suffisante pour assurer un bon contrôle du procédé. En revanche, si l'horizon est trop grand, les erreurs de modélisation influencent de manière trop importante la commande.

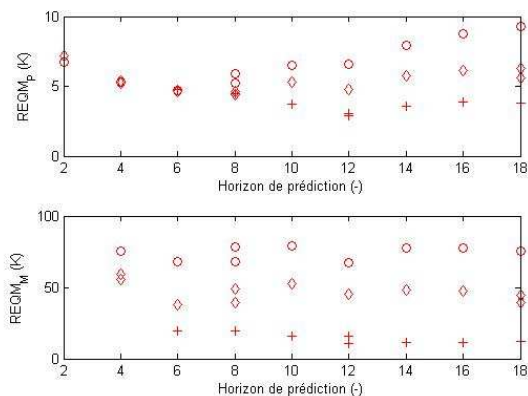


Figure 3 : Peinture blanche, influence du modèle sur les REQM : o (noir), + (blanc), losange (moyen)

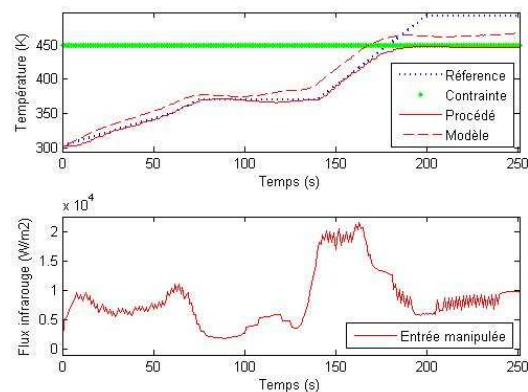


Figure 4 : Peinture blanche, meilleurs résultats de poursuite, et commande appliquée

Les incertitudes de modélisation engendrent une augmentation de la $REQM_m$ qui passe de 10-20K pour le modèle de peinture blanche à 70-80K pour le modèle de peinture noire

(Figure 3). En outre, la commande prédictive et la boucle fermée permettent à nouveau de limiter l'influence de l'erreur de modélisation sur l'objectif de commande, le $REQM_P$ étant de 3-5K pour le modèle de peinture blanche et 5-10K pour le modèle de peinture noire.

4. Conclusion

En conclusion, ce travail montre que la couleur blanche est la plus sensible à la variation en ligne de l'absorptivité. Pour les deux peintures considérées, l'utilisation d'une valeur constante pour le coefficient d'absorption de la peinture dans la commande prédictive à modèle interne, conduit à une certaine robustesse de la commande en boucle fermée du procédé de cuisson de peinture, en dépit du fait que le coefficient réel d'absorption de peinture est temps variant.

Par conséquent, le contrôle en boucle fermée permet, grâce à la commande prédictive à modèle interne qui possède de façon intrinsèque des propriétés de robustesses intéressantes, d'atteindre les objectifs de commande fixés. Le cycle de cuisson d'une peinture, même avec une méconnaissance de certains des paramètres thermiques, peut donc être commandé en ligne par un contrôleur prédictif basé sur le modèle. En outre, il existe à chaque fois un optimum sur le réglage de l'horizon de prédiction de la commande.

Une perspective intéressante concerne l'évaluation de l'utilisation d'un observateur (capteur logiciel en ligne basé sur un modèle) pour estimer le coefficient d'absorption. En injectant cette estimation en tant que perturbation d'entrée mesurée, ceci devrait permettre d'améliorer les résultats de poursuite.

Références

- [1] Bombard, I., Laurent, P., Lieto, J., (2008). A model for the infrared cure of powder coatings based on surface absorptivities in situ measurements, *Journal of Coatings Technology and Research*, 5(3), 353-363.
- [2] Bombard, I., da Silva, B., Dufour, P., Laurent, P., Lieto, J., Contrôle par commande prédictive d'un procédé de cuisson sous infrarouge de peintures de poudre, *Congrès Français de Thermique, SFT 2008, Toulouse*, (Juin 2008).
- [3] Qin, S.J., Badgwell, T.A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology, *Control Engineering Practice*, 11(7), 733-764.
- [4] Bombard, I., Contribution à l'étude, au contrôle et à la commande d'un procédé de cuisson radiatif de peintures en poudre, thèse de l'Université Claude Bernard Lyon 1 (2007).
- [5] Dufour, P., Touré, Y., Blanc, D., Laurent, P., (2003). A nonlinear distributed parameter model predictive control strategy : On-line calculation time reduction and application to an experimental drying process, *Computers & Chemical Engineering*, 27(11), 1533-1542.
- [6] Bombard, I., Laurent, P., Jeandel, G., Lieto, J., Etude de l'influence des propriétés radiatives des peintures et des lampes infrarouge sur la cuisson des peintures en poudre, *Congrès Français de Thermique, SFT 2007, Ile des Embiez*, (29 mai – 1er juin 2007).

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au support financier et technique de Philips Eclairage, EDF et de l'ADEME. La société Dupont Powder Coatings France SAS a gracieusement fourni les peintures utilisées durant l'étude. Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements à ces sociétés pour leur aide et leurs conseils.