

Contrôle par commande prédictive d'un procédé de cuisson sous infrarouge de peintures en poudre.

Isabelle Bombard, Bruno da Silva, Pascal Dufour*, Pierre Laurent, Joseph Lieto.

Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés (LAGEP) ; UMR CNRS 5007 ; UCB Lyon 1 / ESCPE Lyon ; 43 boulevard du 11 Nov. 1918 ; 69622 Villeurbanne Cedex ; France.

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

Résumé – Cette étude présente le développement d'une commande de procédé de cuisson de peinture en poudre sous infrarouge en utilisant une structure de commande prédictive à modèle interne. Le modèle de cuisson, issu d'études précédentes, est utilisé pour prédire le comportement de la peinture en réponse à différentes intensités radiatives imposées à la surface du film, la cuisson étant suivie au travers de la mesure de température de l'ensemble support + peinture. Cette commande a été implémentée sur un four de cuisson de laboratoire et testée pour des poursuites de trajectoire en température.

Nomenclature

Y_p	Variable de sortie du procédé, mesurée,	N_p	horizon de prédiction,
Y_m	Variable de sortie du modèle, calculée,	N_c	horizon de commande,
Y_{ref}	Trajectoire imposée à la sortie,	J	critère de performance,
e	écart mesure – référence,	k	indice discret du temps présent,
u	Variable de commande,	$Gloss$	indice de brillance,
T	température, K	x	degré de conversion.

1. Introduction

L'objectif de ce travail est de démontrer la faisabilité pratique de la commande d'un procédé de cuisson de peintures en poudre sous infrarouge, sachant que la qualité finale d'un feuil de peinture dépend essentiellement de la maîtrise de l'évolution des températures au sein de la couche de peinture. La commande en ligne est nécessaire car le comportement d'absorption de la peinture vis-à-vis des émetteurs infrarouge (en fonction de leur tension d'alimentation) est fortement variable. Cette variabilité dépend principalement de l'amplitude du flux infrarouge nécessaire et celui-ci, en tant que commande, est à ajuster pendant la cuisson. Ce comportement radiatif difficile à modéliser et le fait de disposer d'un modèle simple mais tout de même précis [1] de prédiction de l'évolution des températures de la peinture pour une configuration infrarouge donnée, nous a amené à proposer une commande prédictive à modèle interne qui possède de façon intrinsèque des propriétés de robustesses intéressantes.

2. La commande prédictive à modèle interne

Historiquement, la commande prédictive à modèle interne, qui est un cas particulier de la commande optimale, est née à la fin des années 1970 [2, 3]. Des travaux ultérieurs ont montrés que cette stratégie était bien adaptée à la cuisson de peintures à l'eau [4]. Dans le cadre de cette étude, le fait de déjà disposer d'un modèle performant nous a orienté tout naturellement vers cette méthode ; le détail de la démarche retenue pour cette étude et les comparaisons avec une commande par PID sont présentés de façon approfondie dans [9].

2.1. Principe de fonctionnement

Dans sa formulation la plus générale, la méthodologie discrète de l'approche de la commande prédictive peut s'illustrer sur le schéma représenté sur la Figure 1 :

1. à chaque instant présent discret k , les sorties futures (sur un horizon de taille N_p , dénommé horizon de prédiction) sont prédites à l'aide d'un modèle de comportement du processus à commander. Ces prédictions sont notées $y_m(k+j/k)$, avec $j = 1, \dots, N_p$ pour indiquer la valeur de la sortie à l'instant $k+j$ calculée à l'instant k . Elles dépendent des valeurs connues jusqu'au temps k (entrées et sorties passées) et des commandes futures $u(k+j/k)$, $j = 0, \dots, N_c - 1$, N_c étant l'horizon de commande,

2. les futurs signaux de commande $u(k+j/k)$, $j = 0, 1, \dots, N_c - 1$ sont calculés en optimisant un critère J (fonction coût) spécifié pour que le procédé soit aussi proche que possible de la trajectoire de référence $y_{ref}(k+j)$, tout en réduisant les efforts de la commande ; des contraintes sur la sortie et/ou sur la commande peuvent être également imposées,

3. finalement, seul le premier élément $u(k/k)$ du vecteur du signal de commande optimale $u(k+j/k)$, $j = 0, 1, \dots, N_c - 1$ est appliqué au système pendant le prochain temps d'échantillonnage et la résolution recommence avec l'étape 1 en prenant en compte les mesures actualisées $y_p(k+1)$ du procédé. Ceci est donc le caractère « boucle fermée » de l'approche, car la résolution sur l'horizon de prédiction est elle effectuée en boucle ouverte. La commande $u(k+1/k+1)$ est en principe différente de $u(k+1/k)$ puisque de nouvelles informations ont pu être prises en compte. Ceci est connu comme le concept de l'horizon fuyant (ou glissant).

En résumé, pendant chaque période d'échantillonnage, il faut disposer d'une mesure et d'une méthode d'optimisation associée à une méthode de résolution du modèle du système sur l'horizon de prédiction. C'est pourquoi la stratégie de commande prédictive fut tout d'abord appliquée et proposée dans le cas de systèmes avec la possibilité de modèles simples.

Actuellement, malgré la puissance croissante des calculateurs, des problèmes de mise en œuvre pratique subsistent et deviennent de plus en plus complexes soit à cause de la résolution du modèle, soit à cause du problème d'optimisation sous-jacent, ou des deux conjointement.

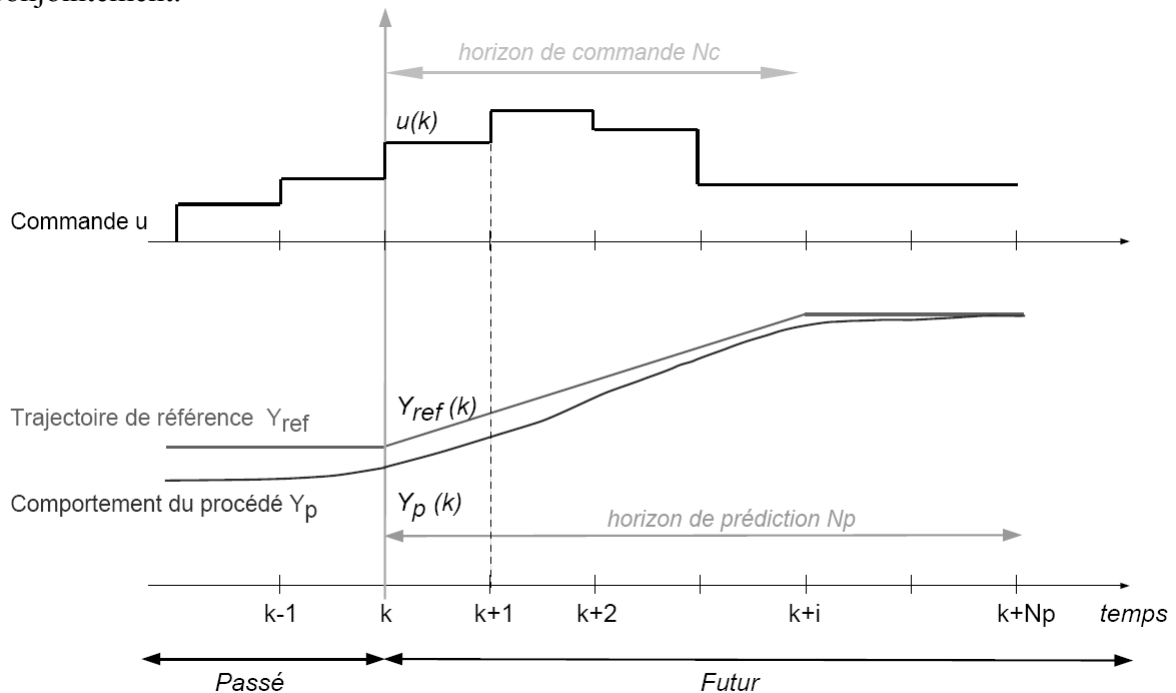


Figure 1 : Représentation schématique du fonctionnement de la commande prédictive

2.2. Ecriture de la commande

L'algorithme d'optimisation (Figure 2) permet de déterminer à chaque instant k les N_c commandes u qui permettent, à cette période d'échantillonnage, de minimiser un critère de performance J [4] :

$$\min_{u=[u_k, \dots, u_{k+N_c-1}]} J(u) \quad \text{avec} \quad J(u) = \sum_{j=k+1}^{j=k+N_p} [y_{ref}(j) - e(k) - y_m(j)]^2 \quad (1)$$

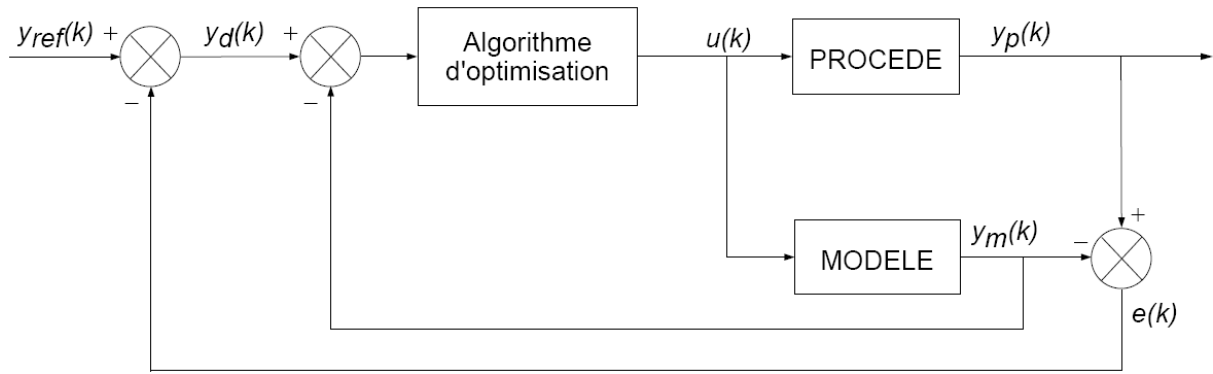


Figure 2 : Commande prédictive à modèle interne en boucle fermée

Ce critère de performance J intègre l'écart à la trajectoire de référence, mais il peut prendre en compte d'autres contraintes telles que les caractéristiques physiques du procédé (puissance maximum, vitesse de variation des actionneurs, etc....).

Parallèlement, un modèle de comportement est nécessaire. Dans le cadre de ces essais, ce modèle de type diffusion décrit, au moyen d'équations aux dérivées partielles, les transferts thermiques au sein du feuil de peinture et du support par conduction sous l'effet d'un flux infrarouge variable [1]. Ce modèle a été résolu en utilisant la méthode des volumes finis sous le logiciel Matlab.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Montage expérimental

Un four expérimental précédemment décrit [5] et représenté Figure 3 a été utilisé pour développer la commande prédictive à modèle interne. Pour assurer l'envoi de la commande et le suivi de la sortie une chaîne d'acquisition utilisant des modules d'entrée-sortie sous protocole MOD-BUS [6] a été utilisée. La communication entre l'ordinateur et la chaîne d'acquisition présentée Figure 4 (sur une liaison série) a été réalisée sous le logiciel Matlab pour une compatibilité complète avec le logiciel de commande MPC@CB [7, 8] également développé sous Matlab. Pour cette application la commande u représente le flux infrarouge incident à la surface de la peinture alors que y_p , la sortie, représente la température de l'échantillon mesurée par thermocouple sur la face inférieure du support.

D'un point de vue pratique, les essais présentés ont été réalisés avec les contraintes suivantes sur les émetteurs infrarouges :

$$\begin{cases} 0 \text{ W.m}^{-2} \leq u \leq 23500 \text{ W.m}^{-2} \\ -2000 \text{ W.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \leq \frac{du}{dt} \leq 2000 \text{ W.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \end{cases}$$

Les supports utilisés sont en tôles (type Q-panel) et la peinture est noire. La période d'échantillonnage retenue est de 1 s et l'horizon de commande $N_c = 1$.

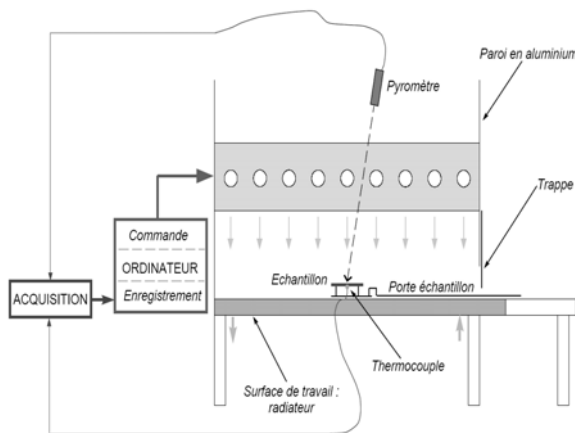


Figure 3 : Four pilote

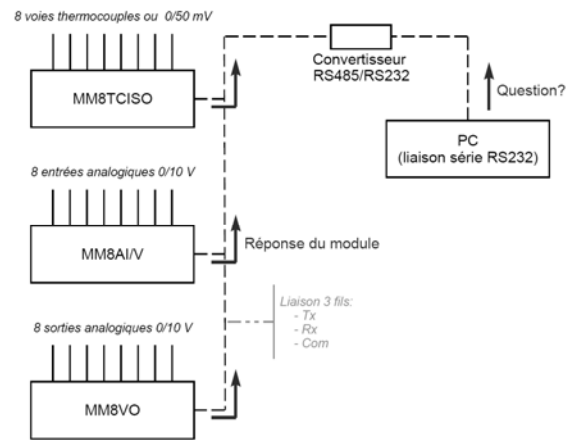


Figure 4 : Système acquisition-commande

3.2. Réglage de l'horizon de prédiction

Nous avons choisit, parmi tous les paramètres de réglage du logiciel MPC@CB, de présenter l'influence du réglage de N_p , l'horizon de prédiction. A partir de différentes simulations, on peut noter sur la Figure 5 que pour des horizons de prédiction compris entre 6 et 16, la poursuite en température est globalement correcte. On peut observer que les écarts se créent au voisinage des discontinuités et pour $N_p = 2$, l'horizon de prédiction est trop court pour la commande du procédé réel : les Figures 6 (évolution de la commande) et 7 (évolution de la vitesse de variation de la commande) montrent au travers de l'évolution des contraintes, que la commande est saturée en amplitude et en vitesse pour cet horizon, le modèle n'anticipant pas suffisamment les changements de pentes de la référence. Les deux autres horizons de prédiction, permettent eux d'anticiper ces changements, et l'horizon de prédiction $N_p = 16$ permet de garantir que le procédé ne dépasse jamais la consigne, ce qui est le plus souvent recherché sur un procédé industriel.

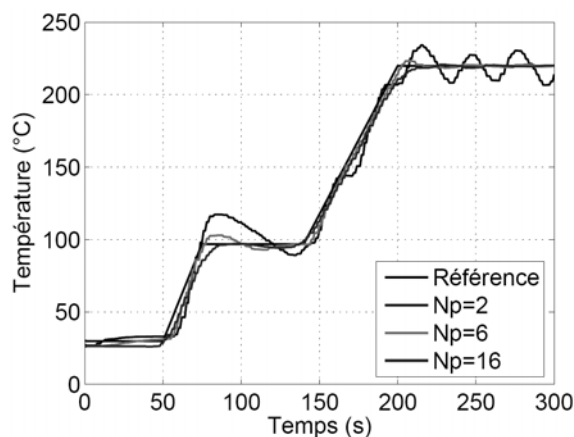


Figure 5 : Calage de l'horizon de prédiction, variable de sortie Température mesurée

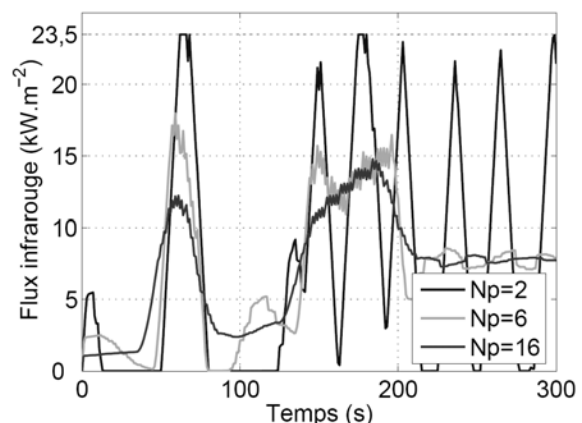


Figure 6 : Calage de l'horizon de prédiction, amplitude de la variable de commande Flux IR

3.3. Commande prédictive et qualité du feuil

L'objectif est ici d'employer la commande mise en place et d'utiliser la possibilité qu'elle confère de travailler avec des trajectoires de cuisson précises pour étudier l'influence des conditions de cuisson dans le four sur l'aspect de surface et sur la rugosité du revêtement final réticulé. La commande est utilisée pour :

- déterminer les conditions minimales en rampe et température de cuisson pour obtenir un film de qualité optimale ;
- déterminer si le mode d'apport de l'énergie influe sur la qualité finale du feuil de peinture.

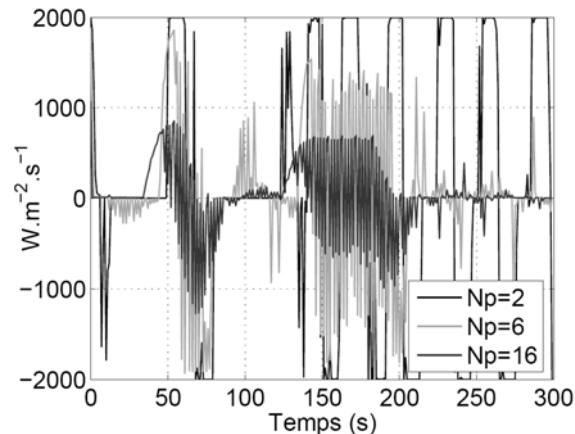


Figure 7 : Calage de l'horizon de prédiction, vitesse de variation de la commande

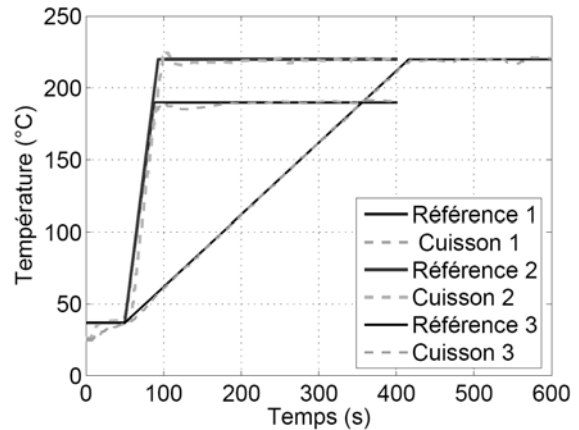


Figure 8 : Profil de température (référence et sortie) pour l'étude de la qualité du feuil

Le Tableau 1 regroupe les résultats de trois expériences réalisées suivant les trajectoires T_{ref} de la Figure 8 pour cuire une peinture noire. Ces résultats montrent que la rampe de cuisson et température maximale ont une influence sur la brillance finale du revêtement (mesurée avec un brillancemètre évaluant la quantité de lumière réfléchi lorsqu'on illumine le revêtement [9]) et par conséquent sur la structure de la surface du revêtement. Ainsi, la brillance nominale de la peinture A Noire se traduisant (d'après la norme retenue par le fabricant de peinture) par une mesure du Gloss à 60° de 30 ± 5 , il apparaît, en comparant les cuissons 1, 2 et 3 à degré de réticulation final x_{max} égal, que seule la cuisson suivant la rampe n°2 permet de répondre à ce critère de qualité. Pour une rampe de montée en température moins rapide (n°3) ou pour une température maximale plus faible (n°1), ces essais montrent qu'on ne satisfait plus le critère de qualité. Les écarts d'épaisseur sont à relier au procédé d'application du film, procédé manuel qui ne permet pas une reproductibilité parfaite ; un grand nombre d'essais ont montrés que l'épaisseur n'avait pas d'influence sur la brillance finale [9].

Cuisson		1	2	3
Rampe	$^\circ\text{C}.\text{s}^{-1}$	4,03	4,23	0,5
T_{max}	$^\circ\text{C}$	190	220	220
x_{max}	-	0,9909	0,9998	0,9996
Épaisseur	μm	40-50	41-70	67-92
Gloss 60°	-	38,5-41,5	28-30	40-41

Tableau 1 : Evolution de la qualité finale du film de peinture

4. Conclusion

L'objectif du travail a été de vérifier l'applicabilité d'une commande au procédé de cuisson radiatif des peintures en poudre et de mettre en place une stratégie de commande prédictive pour les systèmes non linéaires décrits par des équations aux dérivées partielles.

La commande prédictive mise en place est une structure de commande par modèle interne. Le cahier des charges de la commande est la poursuite d'une trajectoire en température, trajectoire définie au préalable et qui doit conduire à un revêtement de qualité optimale.

Des expériences ont permis de souligner l'importance du choix de l'horizon de prédiction lié à la commande. Un horizon de prédiction faible risque de mal prendre en compte le futur comportement du procédé tandis qu'un grand horizon de prédiction nécessite un grand temps de calcul.

Les expériences réalisées (sans prise en compte de la contrainte sur la sortie dans ces résultats) ont mis en évidence la faisabilité de ce type de commande et garantissent que dans le futur on pourra appliquer ce type d'optimisation sous contrainte à des propriétés d'usage, comme la brillance par exemple. Pour cela, une mesure en ligne ainsi qu'un modèle d'évolution de ces propriétés sont nécessaires.

Références

- [1] Bombard, I., Laurent, P., et Lieto, J. (2007c). A model for the infrared cure of powder coatings based on surface absorptivities in situ measurements. *Journal of Coatings Technology and Research*, accepté
- [2] Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L., et Papon, J. (1978). Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes. *Automatica*, 14 : 413–428.
- [3] Cutler, C. R. et Ramaker, B. C. (1980). Dynamic matrix control - a computer control algorithm. *Proceedings of the Automatic Control Conference*, San Francisco.
- [4] Dufour P., Touré Y., Blanc D. and Laurent P. A Nonlinear Distributed Parameter Model Predictive Control Strategy: On-line Calculation Time Reduction and Application to an Experimental Drying Process, *Computers & Chemical Engineering*, 2003, vol. 27, n°11, pp 1533-1542.
- [5] Bombard, I., Véchet, L., Laurent, P., et Lieto, J. (2005). Optimisation de la cuisson sous infrarouge de deux types de peintures en poudre. *Congrès Français de Thermique*, SFT 2005, Reims.
- [6] MODICON (1996). Modicon modbus protocol reference guide, www.eecs.umich.edu/~modbus/documents/PI_MBUS_300.pdf
- [7] Dufour, P. (2007). MPC@CB. Université Claude Bernard Lyon 1 - EZUS. Pour utiliser MPC@CB, merci de contacter l'auteur : dufour@lagep.univ-lyon1.fr.
- [8] Abid K., Dufour P., Bombard I., Laurent P. (2007)/ Model predictive control of a powder coating curing process: an application of the MPC@CB© software », acte du 26^{ième} IEEE Chinese Control Conference (CCC) 2007, Zhangjiajie, Chine, vol. 2, pp. 630-634, 27-29 Juillet 2007.
- [9] 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

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.