

**This document must be cited according to its final version
which is the HDR:
Pascal Dufour¹,
« Commande prédictive et identification optimale en boucle fermée »,
Mémoire d'HDR
UCBL1, 29 avril 2011**

Comitee members:

**Luc DUGARD (DR CNRS au GIPSA-lab UMR CNRS Grenoble, rapporteur),
Hassan HAMMOURI (Prof. des Universités à l'UCBLyon 1, examinateur),
Michel KINNAERT (Prof. des Universités à l'ULBruxelles, rapporteur),
Philippe POIGNET (Prof. des Universités à l'Université Montpellier 2, examinateur),
José RAGOT (Prof. des Universités à l'INPLorraine, rapporteur et président du jury).**

**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>

Commande prédictive et identification optimale en boucle fermée

Soutenance d'**Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)**
Pascal Dufour

Section 61 du CNU, discipline : automatique

dufour@lagep.univ-lyon1.fr

<http://www.tinyurl.com/dufourpascal>

Université Claude Bernard Lyon 1

Faculté des Sciences et Technologies

Département Génie Électrique et Procédés

Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés (LAGEP), UMR 5007 CNRS

29 avril 2011



- Curriculum Vitae
- Activités de recherche : contexte
- Bilan de l'axe de recherche “commande prédictive”
- Bilan de l'axe recherche “identification optimale en boucle fermée”
- Projets de recherche pour l'avenir

- Curriculum Vitae
- Activités de recherche : contexte
- Bilan de l'axe de recherche “commande prédictive”
- Bilan de l'axe recherche “identification optimale en boucle fermée”
- Projets de recherche pour l'avenir

● Diplômes/Parcours

- 1995 : **DEA** en Automatique
- 2000 : **Thèse de doctorat** en Automatique
- 2000/2001 : **Postdoctorat** en Automatique
- 2001-présent : **Maître de Conférences** à l'UCBL1/LAGEP

● Service statutaire

- 192h TD/an en **automatique et informatique industrielle** (L2, L3, LP, M1) ...
- ... dont encadrement de **projets internes tutorés** en automatique (1/an LP, 1/an M1)

● Enseignement

- 2003-présent : **resp. plateforme de TP** d'automatique du Master (procédés, automates, logiciels indus. et scient.)
- 2003-présent : **resp. d'UEs** en automatique/informatique industrielle
- 2003-2007 : **resp. formation** DEUST Automatique
- 2007-2008 : **resp. commission formation UFR** GEP (4 mentions, 400 étudiants, 50 EC, 200 industriels)
- 2010-présent : **co-resp. formation M2** ERGE3

● Recherche

- 2006 : resp. du GT EDP du GDR MACS
- 2009-présent : correspondant (futur responsable) UCBL1 de la formation M2R Automatique

● Autres

- 2002-2006 : membre élu au CA UCBL1 & Relations Internationales UCBL1
- 2003-2008 : membre élu CSES 61 UCBL1 & ECL

● Interactions

- **Local** : SNLEP & TCMC (LAGEP), LGPC (CPE)
- **International** : KUL (Belgique), ENI Tunis, U. Delaware (USA), IITB (Inde), ECUST (Chine)

● Accueil de chercheurs

- Prof. Bhartiya (IITB, 1 mois invité UCBL1 2010)
- Labbane (1 mois en 2010 & 2011)
- De Temmerman (3 semaines 2007 & 2008)

● Relations industrielles

- Via les projets en génie des procédés, où j'interviens
- **PMI Automatique** : stage M2P 2011, logiciel MPC@CB, demande CIFRE

- 1 **stage post-doctoral** officiellement co-encadré : Daraoui, (10 mois en 2006/2007)
- 2 **thèses de doctorat** officiellement co-encadrées et **soutenues** : Da Silva (2008), Flila (2010)
- 1 **thèse de doctorat** en co-tutelle officiellement co-encadrée et **en cours** : Labbane (2010-...)
- 3 **thèses de doctorat non** officiellement **co-encadrées** et soutenues : Edouard (2003), Bombard (2007), De Temmerman (2008). **Au moins une publication de revue internationale**
- 1 **stagiaire/an** de M2R/DEA, officiellement encadré ou co-encadré et avec mémoire défendu

● Production scientifique

- 12 **articles de revue internationale** à comité de sélection
- 2 **articles de revue nationale** à comité de sélection
- 20 **communications en conférence internationale** à comité de sélection et actes (11 IFAC ou IEEE)
- 3 **communications en conférence nationale** à comité de sélection et actes

● Valorisation hors publications

- Création et dépôt de **logiciels** :
 - 2007 : **MPC@CB** + valorisation 2009-2011 par LST (50k€)
 - 2011 : **ODOE4OPE** + valorisation demandée par CIFRE
- **Sites internet** : LAGEP, HAL, MPC@CB, ODOE4OPE, Academia, CiteULike, ResearchGate ...

- **Jurys de thèse** : 4
- **Organisation**
 - **Manifestations scientifiques** : JDMACS-JNMACS 2005, JJC 2002
 - Organisation du **M2R Automatique**
- **Relecture** : revues (JPC, IEEE TAC, DRT, ...), conférences (CDC, DYCOPS, ...)
- **Membres de GT** du GDR MACS : Commande Prédictive, EDP
- **Sociétés savantes** : 1 des 2 référents du LAGEP à AXELERA

- Curriculum Vitae
- **Activités de recherche : contexte**
- Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"
- Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"
- Projets de recherche pour l'avenir

- **LAGEP** : automatique, génie des procédés, génie pharmaceutique
- Environnement **local** : chimie et procédés
- Projets **pluridisciplinaires**
- Du procédé au **modèle** : très particulier, EDP, non linéarités
- **Mes travaux**
 - **Objectif** : contribuer à l'amélioration des performances des procédés, par des outils de l'automatique
 - **Axe 1** : commande prédictive pour des procédés à modèle EDP
 - **Axe 2** : identification paramétrique en boucle fermée par commande prédictive

- Curriculum Vitae
- Activités de recherche : contexte
- Bilan de l'axe de recherche “commande prédictive”
 - Aspects théoriques
 - Une des études : résultats expérimentaux
- Bilan de l'axe recherche “identification optimale en boucle fermée”
- Projets de recherche pour l'avenir

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Aspects théoriques : contexte et problématiques

- Commande de procédés où les **phénomènes spatiaux** sont non négligeables : modèles EDP
- **Contraintes** entrées et sorties du procédé à respecter
- Limitation : **temps de calcul** de la commande vs dynamique du procédé
- **Robustesse** de la commande

⇒ Développer une approche de **commande, optimale sous contraintes, à faible coût de calcul en ligne**

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Aspects théoriques : formulation utilisée

- Commande optimale avec contraintes : **commande prédictive**
- **Avantages** : très nombreux travaux et applications (4000+) dans le monde [Qin et Badgwell, 2003]
- **Idée** : insérer dans la boucle fermée, à chaque instant présent k , des éléments de prédiction

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\tilde{u}} J(\tilde{u}) = J(y_p(j), u(j)) = \sum_{j=k+1}^{k+N_p} F(y_p(j), u(j)) \\ u(j) = f_u(\tilde{u}, j, k) \quad \forall k > 0, \quad \forall j \in [k+1, k+N_p] \\ u(\cdot) \in U \subset \mathbb{R}^m \\ c_i(y_p(k), u(j)) \leq 0 \quad \forall k > 0, \quad \forall j \in [k+1, k+N_p] \\ \forall i \in [1, n_c] \end{array} \right. \quad (1)$$

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Aspects théoriques : formulation utilisée - paramétrisation de l'argument de commande

- $u(j) = u(k) \forall k > 0, \forall j \in [k + 1, k + N_p]$
- 1 seul argument recherché : un échelon
- **Avantage** : temps de calcul plus faible
- **Inconvénient** : perte de flexibilité dans la résolution

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Aspects théoriques : formulation utilisée - Utilisation du modèle interne (1/2)

- **Modèle** nécessaire pour réaliser la **prédiction** des signaux dans la futur N_p
- **Modèle considéré** décrit par des EDP, non linéaires, à commandes et/ou mesures frontières et/ou réparties :

$$(S_{NL}) \begin{cases} \frac{\partial x_m}{\partial t}(z, t) = f_d(x_m(z, t), u(t)) \quad \forall z \in \Omega, \quad t > t_i \\ f_f(x_m(z, t), u(t)) = 0 \quad \forall z \in \partial\Omega, \quad t > t_i \\ y_m(t) = h(x_m(z, t), u(t)) \quad \forall z \in \Omega \cup \partial\Omega, \quad t > t_i \\ x_m(z, t) = x_{m_i}(z) \quad \forall z \in \Omega \cup \partial\Omega, \quad t = t_i \end{cases} \quad (2)$$

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Aspects théoriques : formulation utilisée - utilisation du modèle interne (2/2)

- $e_y(k) = y_p(k) - y_m(k)$: **erreur** est mise à jour à chaque k
- **Hypothèse** : $e_y(k)$ **constante** sur l'horizon de prédiction
- **Approximation des signaux futurs** dans le problème d'optimisation (1) : $y_p(j) = y_m(j) + e_y(j) = y_m(j) + e_y(k)$
- Permet de formuler un **problème d'optimisation sous contraintes basé sur le modèle** : soluble

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{u(k)} J(u(k)) = J(y_m(j), e_y(k), u(j)) \\ u(j) = u(k) \quad \forall k > 0, \quad \forall j \in [k+1, k+N_p], \quad u(k) \in U \subset \mathbb{R}^m \\ c_i(y_m(j), e_y(k), u(j)) \leq 0 \quad \forall k > 0, \quad \forall j \in [k+1, k+N_p], \quad \forall i \\ \text{basé sur la résolution du modèle de prédiction (S}_{NL}) \end{array} \right. \quad (3)$$

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Aspects théoriques : formulation utilisée - prise en compte des contraintes d'entrée

- **Contraintes fortes** : doivent être satisfaites à chaque instant k
- **Limitation** : tâche de résolution peut être stoppée à chaque itération
- On transforme $u(k)$ contraint en un **$p(k)$ non contraint** :
$$u(k) = g(p(k)) = g_{moy}(k) + g_{amp}(k) \tanh \left[\frac{p(k) - g_{moy}(k)}{g_{amp}(k)} \right]$$
- **Avantage** : satisfaction de ces contraintes à chaque itération, à chaque k
- **Inconvénient** : perte de sensibilité aux limites

- **Contraintes faibles** : une solution peut ne pas toujours exister [ARIACL02]
- Utilisation de la méthode des **pénalités externes**

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{p(k)} J_{tot}(p(k)) = J(p(k)) + J_{ext}(p(k)) \\ J_{ext}(p(k)) = \sum_{j=k+1}^{k+N_p} \left(\sum_{i=1}^{i=n_c} \omega_i \left[\max \left(0, c_i(y_m(j), e_y(k), u(j)) \right) \right]^2 \right) \\ u(j) = u(k) = g(p(k)) \quad \forall k > 0, \quad \forall j \in [k+1, k+N_p] \end{array} \right. \quad (4)$$

- **Problème d'optimisation pénalisé, sans contrainte**

- Résolution du système non linéaire (S_{NL}) : approchée en **deux étapes**
 - 1 **Hors ligne** : issu de (S_{NL}), calcul d'un modèle non linéaire (S_0), d'entrée $u_0(t)$
 - 2 **En ligne** : issu de (S_{NL}), calcul du modèle linéarisé temps-variant (S_{LTV}), d'entrée $\Delta u(t)$

$$\begin{cases} u(t) = u_0(t) + \Delta u(t) \\ x_m(z, t) = x_0(z, t) + \Delta x_m(z, t) \\ y_m(t) = y_0(t) + \Delta y_m(t) \end{cases} \quad (5)$$

Le **problème pénalisé (non contraint)** est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\Delta p(k)} J_{tot}(\Delta p(k)) = J(\Delta y_m(j), e_y(k), \Delta u(j)) + \dots \\ \dots J_{ext}(\Delta y_m(j), e_y(k), \Delta u(j)) \\ \Delta u(j) = \Delta u(k) = g'(g, \Delta p(k)) \quad \forall k > 0, \quad \forall j \in [k+1, k+N_p] \\ \text{basé sur les résolutions :} \\ \text{en ligne du modèle de prédiction } (S_{LTV}) \\ \text{et hors ligne du modèle } (S_0) \end{array} \right. \quad (6)$$

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Aspects théoriques : passage des modèles de la dimension infinie à la dimension finie
(1/2)

- **Deux approches** pour la conduite d'un procédé basée sur ce type de modèle :
 - 1/ **Garder la structure EDP (dimension infinie)**
 - Existence et unicité de la solution
 - Synthèse de la commande : pour des modèles bien spécifiques
 - Relativement peu d'applications

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Aspects théoriques : passage des modèles de la dimension infinie à la dimension finie
(2/2)

- **Deux approches** pour la conduite d'un procédé basée sur ce type de modèle :
 - 2/ **Approximation en dimension finie (EDO, EAD)**
 - Très nombreux travaux
 - Méthodes d'approximation : solution ou équations
 - Permet l'utilisation de la très large théorie de l'automatique en dimension finie
 - Beaucoup d'applications

⇒ **Choix : approximation en dimension finie**

- Minimisation de $J_{tot}(\Delta p_k)$: choix de l'**algorithme de Levenberg-Marquardt**

$$\begin{cases} \Delta p_k^{i+1} = \Delta p_k^i + \delta \Delta p_k^i \\ \left(\frac{\partial^2 J_{tot}}{\partial \Delta p_k^i{}^2} + \lambda I \right) \cdot \delta \Delta p_k^i = -\gamma \cdot \frac{\partial J_{tot}}{\partial \Delta p_k^i} \end{cases} \quad (7)$$

- **Avantage** : robuste, rapide au voisinage d'un minimum local + sensibilités calculables hors ligne (via l'utilisation de (S_{LTV}))
- **Inconvénient** : trouve un minimum local, inversion de matrice

⇒ Création du **logiciel MPC@CB**

- Curriculum Vitae
- Activités de recherche : contexte
- Bilan de l'axe de recherche “commande prédictive”
 - Aspects théoriques
 - Une des études : expérimentaux
- Bilan de l'axe recherche “identification optimale en boucle fermée”
- Projets de recherche pour l'avenir

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Cuisson de peinture en poudre (thèse de Bombard)

- **Encadrants** : P. Laurent et J. Lieto (LAGEP, "Génie des Procédés") + ADEME + EDF + Dupont Coatings + Philips Éclairage
- **Mon intervention**, pour la partie automatique :
 - **Thèse** : de mai 2006 à novembre 2007
 - Stage de **master recherche** (Kamel Abid) : printemps 2006
- Prémisses du **logiciel MPC@CB**
- **Procédé** : cuisson de peintures en poudre, sur un support plan et métallique, sous infrarouge

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Cuisson de peinture en poudre : le procédé (1/2)

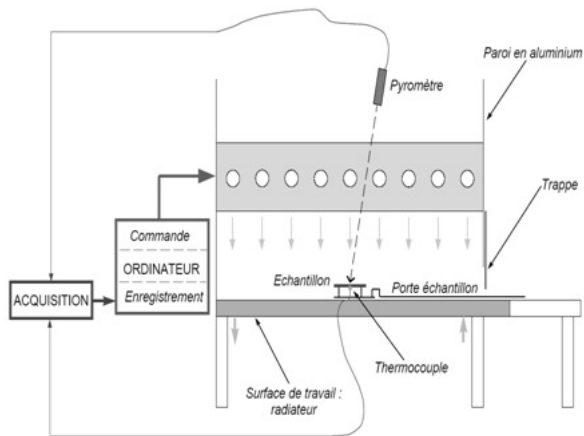


FIGURE: Schéma de principe du procédé pilote.

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Cuisson de peinture en poudre : le procédé (2/2)

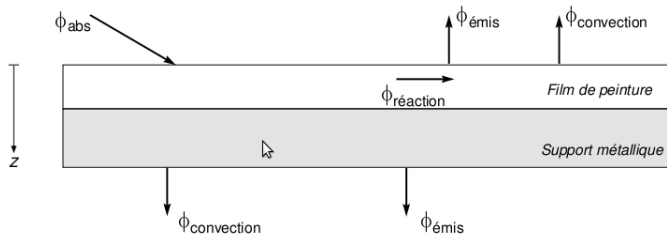


FIGURE: Schéma de la couche de peinture sur son support.

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ en } z = 0, t > 0 \text{ (surface supérieure irradiée de la peinture) :} \\ -\lambda_{c,p} \frac{\partial T_p}{\partial z}(z, t) = \alpha_p(\cdot) \phi_i(t) \\ \quad - \epsilon_p(\cdot) \sigma \cdot (T_p^4(0, t) - T_{ext}^4) \\ \quad - h_p \cdot (T_p(z, t) - T_{ext}) \\ \\ \bullet \forall 0 < z < e_p, t > 0 : \\ \rho_p C p_p \frac{\partial T_p}{\partial t}(z, t) = \nabla (\lambda_{c,p} \nabla T_p) \\ \\ \bullet \text{ en } z = e_p, t > 0 \text{ (interface peinture-support) :} \\ -\lambda_{c,p} \frac{\partial T_p}{\partial z}(z, t) = -\lambda_{c,s} \frac{\partial T_s}{\partial z}(z, t) \\ \quad T_p(z, t) = T_s(z, t) \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet \forall e_p < z < e_p + e_s, t > 0 : \\ \rho_s C p_s \frac{\partial T_s}{\partial t}(z, t) = \nabla (\lambda_{c,s} \nabla T_s) \\ \\ \bullet \text{ en } z = e_p + e_s, t > 0 \text{ (surface inférieure du support) :} \\ -\lambda_{c,s} \frac{\partial T_s}{\partial z}(z, t) = -\epsilon_s \sigma \cdot (T_s^4(z, t) - T_{ext}^4) \\ \quad - h_s \cdot (T_s(z, t) - T_{ext}) \\ \\ \bullet \forall z \in [0, e_p + e_s], t = 0 \\ T_i(z, 0) = T_{ext} \end{array} \right. \quad (9)$$

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Cuisson de peinture en poudre : problématique

- Objectif sur une caractéristique **cible** liée au produit **final**
→ objectif de **conduite** de la sortie mesurée $T_p(e_p + e_s, t)$
pendant le cycle de cuisson
- **Modèle** : EDP non linéaire, à commande et mesure frontières
- Loi de commande doit être **robuste** : incertitude non mesurable sur $\alpha_p(\cdot)$ (dépend de la commande) a un très fort impact sur le cycle [Bombard, 2007]
- **Commande** $\phi_i(t)$: contrainte en amplitude et en vitesse

Influence la poursuite de trajectoire de température (face inférieure) de la valeur :

- 1/ paramètre α_p utilisé dans modèle : "noir", "moyen", "blanc" (via expériences à commande constante)
- 2/ horizon de prédiction N_p

⇒ Analyse :

- **Réglage de α_p nécessaire dans le modèle :**

- Peinture blanche : meilleurs résultats avec le modèle "blanche"
- Peinture noire :
 - meilleurs résultats avec le modèle "moyen"
 - pires résultats avec le modèle "noir"

⇒ α_p utilisé dans modèle = $f(\text{couleur réelle}) + \Delta_{\alpha_p}(t, \dots)$

⇒ réglage de α_p utilisé dans modèle : pas évident

- **Malgré cette incertitude Δ_{α_p} :**

- Pour les 2 peintures : **poursuites convenables**
- \exists **réglerage optimal** de l'horizon de prédiction (convexité : $N_p = 12$)

Influence de la trajectoire de référence sur la qualité finale de la peinture (gloss à 60 deg C) :

Cuisson	1	2	3
Rampe (°C.s-1)	4,03	4,03	0,5
Tmax (°C)	190	220	220
xmax (-)	0,9909	0,9998	0,9996
Épaisseur (μm)	0-50	41-70	67-92
gloss à 60 deg C	40+/-1,5	29+/-1	40,5+/-0,5

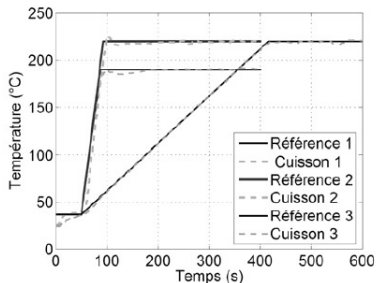


FIGURE: Poursuite expérimentale de trajectoire de température (face inférieure).

⇒ Analyse :

- Le type de **référence impacte sur la brillance finale** du revêtement
- Pour une **référence donnée, la poursuite est possible**
- **Recette** de cuisson :
 - Choix, avant cuisson, de la **valeur cible du gloss** à 60 deg C
 - **Implique une référence** à poursuivre pendant la cuisson (base de données)
 - En ligne, la **poursuite de trajectoire de cette référence mène à ce gloss** cible final

- Curriculum Vitae
- Activités de recherche : contexte
- Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"
- Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"
 - Aspects théoriques
 - Une des études : résultats de simulation
- Projets de recherche pour l'avenir

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Qualité de l'estimation paramétrique : motivations

● Besoins :

- **Simulateur ou commande avancée** : besoin d'un modèle dynamique
- Choisir un modèle puis **identifier les paramètres** [Ljung, 1999]
- Estimations de ces paramètres : fonction de la **richesse des données entrée-sortie**

● Identification paramétrique :

- repose sur des **expérimentations sur le processus réel**
- 1/ **réglage de l'entrée de commande** $u(t)$ du système et récolter les données en sortie $y_p(t)$
- 2/ **estimation des valeurs des paramètres** constants inconnus θ du modèle
- ces 2 tâches sont en général **découplées**

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Objectifs

- Pour simplifier : traitement du cas **SISOSP**
- $\frac{\partial y_p}{\partial \theta}(t)$: **sensibilité paramétrique** de la sortie du procédé y_p par rapport au paramètre constant inconnu du modèle θ

Hypothèse

1. Le paramètre θ influence une des sorties possibles
2. La sortie choisie y_p est **sensible** à θ

⇒ **Comment choisir le signal d'excitation $u(t)$** pour qu'il excite suffisamment le procédé, en vue de l'**estimation** de θ ?

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Aspects théoriques : approche adoptée

- **3 idées principales :**

- 1/ Ajuster, de façon optimale [Pronzato, 2008], en ligne, sous contraintes d'exploitation et en boucle fermée, la commande $u(t)$
- 2/ Maximiser la sensibilité $\frac{\partial y_p}{\partial \theta}(t)$
- 3/ Estimer conjointement le paramètre constant inconnu θ du modèle du procédé

- **Utiliser :** les mesures entrée-sortie du procédé, un modèle dynamique

Études existantes : récentes, peu nombreuses, **linéaires** sorties/paramètres, [Nikolaou, 1996]

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Aspects théoriques : formulation initial du problème d'optimisation

Problème d'optimisation contraint pour l'identification est initialement :

$$(POCI_l) \left\{ \begin{array}{l} \max_{\tilde{u}} J(\tilde{u}) = \sum_{j=k+1}^{k+N_p} \left(\frac{\partial y_p}{\partial \theta}(j) \right)^2 \\ \tilde{u} = \{p_u(1), \dots, p_u(n_{pu})\} \\ u(j) = f_u(p_u(i), j, k) \quad i \in [1, n_{pu}] \\ u(\cdot) \in U \subset \mathbb{R} \\ \forall k > 0, \forall j \in [k+1, k+N_p], \forall i \in I^{nc} : \\ c_i(x_p(j), y_p(j), u(j)) \leq 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Aspects théoriques : problème de cette formulation initiale

- **Problème** : formulation basée sur des signaux dans le futur j : $x_p, y_p, \frac{\partial y_p}{\partial \theta}$ **non disponibles à k** dans le futur j
- Afin d'obtenir un problème soluble à chaque k , **approcher ces signaux dans le futur j** grâce :
 - aux **mesures** y_p et u et aux **estimations** à chaque k
 - **intégration du modèle du procédé et du modèle couplé de sensibilité** sur N_p
 - structure de **commande par modèle interne**

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Aspects théoriques : introduction du modèle

$$(M) \begin{cases} \dot{x}_m(t) = f(x_m(t), \theta, u(t)), & t > t_i \\ y_m(t) = h(x_m(t), \theta, u(t)), & t > t_i \\ x(t) = x^{t_i}, & t = t_i \end{cases} \quad (11)$$

- état $x_m \in \mathbb{R}^n$, entrée $u \subset \mathbb{R}$ et la sortie $y_m \in \mathbb{R}$
- θ : le paramètre du modèle à **valeur inconnue**
- (M) : **modèle** dynamique non linéaire (ou non) en entrée/sortie et paramètre

Hypothèse

Dans le système (11), f et h sont de classe C^1 .

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Aspects théoriques : introduction de l'observateur

Idée : θ est une **nouvelle variable d'état** à estimer.

Hypothèse

*Le système d'état étendu $[x_m \ \theta]$ **est observable**.*

Utilisation de la **large théorie des observateurs** pour les systèmes non linéaires :

- **Design d'un observateur** (O) basé sur le modèle (M)
- **Entrées** : $y_p(k)$ et $u(k)$
- **Sorties** : $\hat{x}_p(k)$ et le paramètre inconnu $\hat{\theta}(k)$

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Aspects théoriques : introduction du modèle de sensibilité

Basé sur le modèle (M) et sur l'observateur (O), le **modèle de sensibilité** (M_θ) décrit :

$$(M_\theta) \begin{cases} \dot{x}_\theta(t) = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial x_m} \frac{\partial x_m}{\partial \theta}(t) \dots \\ \dots = f_\theta(x_\theta(t), x_m(t), \hat{\theta}(t), u(t)), & t > t_i \\ y_\theta(t) = \frac{\partial h}{\partial x_m} \frac{\partial x_m}{\partial \theta}(t) \dots \\ \dots = h_\theta(x_\theta(t), x_m(t), \hat{\theta}(t), u(t)), & t > t_i \\ x_\theta(t) = x_\theta^{t_i}, & t = t_i \end{cases} \quad (12)$$

- l'état $x_\theta = \frac{\partial x_m}{\partial \theta} \in \mathbb{R}^n$: **sensibilité de l'état** du modèle (M) **par rapport au paramètre** θ
- la sortie $y_\theta = \frac{\partial y_m}{\partial \theta} \in \mathbb{R}$: **sensibilité de la sortie** du modèle (M) **par rapport au paramètre** θ

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Aspects théoriques : approximation des signaux futurs

- **A k , en utilisant :**
 - les **mesures** y_p et u et les **estimations** issues de (O)
 - les **prédictions** des 2 modèles (M) et (M_θ) sur N_p
- **Approximation des signaux** nécessaires dans le $(POCI_l)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall k \geq 0, \forall j \in [k+1, k+N_p] : \\ x_p(j) = x_m(j) + (\hat{x}_p(k) - x_m(k)) \\ y_p(j) = y_m(j) + (y_p(k) - y_m(k)) \\ \frac{\partial y_p}{\partial \theta}(j) = \frac{\partial y_m}{\partial \theta}(j) \\ \forall k \geq 0 : \\ \theta = \hat{\theta}(k) \end{array} \right. \quad (13)$$

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Aspects théoriques : formulation finale adoptée

Problème d'optimisation contraint pour l'identification **basé sur le modèle non linéaire** :

$$(POCI_{NL}) \left\{ \begin{array}{l} \max_{\tilde{u}} J(\tilde{u}) \\ J(\tilde{u}) = \sum_{j=k+1}^{k+N_p} \left(\frac{\partial y_m}{\partial \theta}(j) \right)^2 \\ \tilde{u} = \{p_u(1), \dots, p_u(n_{pu})\} \\ u(j) = f_u(p_u(i), j, k) \quad i \in [1, n_{pu}] \\ u(\cdot) \in U \subset \mathbb{R} \\ \forall k > 0, \forall j \in [k+1, k+N_p], \forall i \in I^{n_c} : \\ c_i(x_m(j) + (\hat{x}_p(k) - x_m(k)), \dots \\ \dots y_m(j) + (y_p(k) - y_m(k)), u(j)) \leq 0 \\ + \text{résolution en ligne de } (M), (M_\theta) \text{ et de } (O) \end{array} \right. \quad (14)$$

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Aspects théoriques : conclusions

- **Approche générique** permettant en ligne de **déterminer, conjointement, la commande** optimale à appliquer et **d'identifier le paramètre inconnu**
- **Hypothèses** ont un **sens physique et structurelles** :
 - 1/ pour la **formulation initiale** du problème
 - 2/ **modèle** (fonctions C^1)
 - 3/ existence d'un **observateur** (hyp. la plus forte)
- **Problème d'optimisation soluble** par n'importe quel algorithme à base de commande prédictive : création du logiciel **ODOE4OPE.univ-lyon1.fr**

- Curriculum Vitae
- Activités de recherche : contexte
- Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"
- Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"
 - Aspects théoriques
 - Une des études : résultats de simulation
- Projets de recherche pour l'avenir

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Cas d'étude : objectifs et modèle

Objectif :

- Cas **simple** (procédé chimique de saponification),
- **Illustration de l'intérêt de l'approche** (sans optimiser le jeu de paramètres de la commande).

Modèle :

$$\begin{cases} \dot{C}_a(t) = -k_v C_a^2(t) + \frac{D(t)}{V} (C_{ain} - C_a(t)), & t > 0 \\ C_a(t) = C_a^0, & t = 0 \end{cases} \quad (15)$$

- $y_m(t) = x_m(t) = C_a(t)$: **concentration d'acétate d'éthyle** dans le réacteur
- $u(t) = D(t)$: **débit d'alimentation en soude**
- $\theta = k_v$: **constante de vitesse** de réaction

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Cas d'étude : observateur

Avec l'état augmenté $[C_a \ k_v]^T$:

$$(O) \begin{cases} \dot{x}_o(t) = A_o(y_p(t))x_o(t) + B_o(y_p(t), u(t)) - \dots \\ \dots S_o^{-1} C^T (C x_o(t) - y_p(t)), t > 0 \\ \dot{S}_o(t) = -\gamma_o S_o(t) + A_o^T(y_p(t)) S_o(t) \dots \\ \dots - S_o(t) A_o(y_p(t)) + C^T C, t > 0 \end{cases} \quad (16)$$

où γ_o est le paramètre de réglage de cet observateur et où :

$$\begin{cases} A_o(y_p(t)) = \begin{pmatrix} 0 & -y_p^2(t) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ B_o(y_p(t), u(t)) = \begin{pmatrix} \frac{u(t)}{\alpha_1} (\alpha_2 - y_p(t)) \\ 0 \end{pmatrix} \\ C = [1 \ 0] \\ S_o : \text{matrice symétrique définie positive.} \end{cases} \quad (17)$$

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Cas d'étude : modèle de sensibilité

Le modèle de sensibilité (M_θ) s'écrit :

$$(M_\theta) \begin{cases} \dot{x}_\theta(t) = -(2x_m(t)\hat{\theta}(t) + \frac{u(t)}{\alpha_1})x_\theta(t) - x_m^2(t), & t > 0 \\ y_\theta(t) = x_\theta(t), & t > 0 \\ x_\theta(t) = 0, & t = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

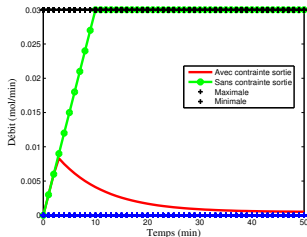
Cas d'étude : conditions de simulation

- On cherche à **maximiser la sensibilité de la concentration d'acétate d'éthyle** par rapport à la **vitesse de réaction**
- **2 cas** ont été simulés dans les conditions suivantes, avec **contraintes d'amplitude et de vitesse sur la commande** :
 - Cas 1 (vert) : la **sortie a une évolution libre**
 - Cas 2 (rouge) : la **sortie est contrainte** à rester en dessous d'un maximum autorisé

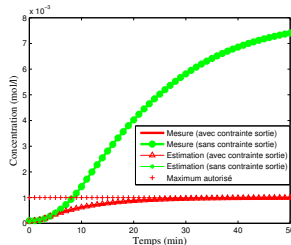
Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Cas d'étude : résultats numériques (1/2)

- **Cas 1 (vert)** : commande est saturée soit en amplitude, soit en vitesse
- **Cas 2 (rouge)** :
 - 3 premières minutes : idem cas 1
 - ensuite, la commande change car prend en compte la **contrainte sortie** qui arrive à saturation (à partir de 30 minutes)



Commande

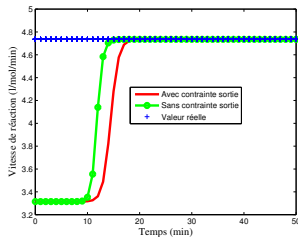


Sortie

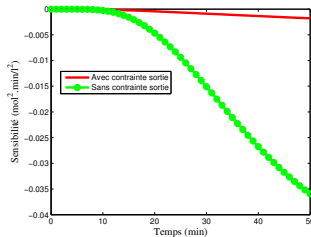
Bilan de l'axe recherche "identification optimale en boucle fermée"

Cas d'étude : résultats numériques (2/2)

- Dans les 2 cas, l'estimation finale du paramètre inconnu est bonne, malgré une erreur initiale d'estimation de 30%
- Convergence de l'observateur : impact de la contrainte sortie
- Le cas 2 permet en plus de garantir un fonctionnement contraint désiré du réacteur pendant l'identification



Estimation du paramètre



Sensibilité

- Curriculum Vitae
- Activités de recherche : contexte
- Bilan de l'axe de recherche “commande prédictive”
- Bilan de l'axe recherche “identification optimale en boucle fermée”
- Projets de recherche pour l'avenir

Pour les 2 axes précédemment décrits, étant donnés :

- **Commande prédictive :**

- 40 ans d'existence
- Très nombreux travaux : théorie, applications

⇒ **Potentiel d'impact : incertain**

- **Identification optimale en boucle fermée :**

- Récent
- Peu de travaux existant
- Nombreuses perspectives : théorie, applications

⇒ **Potentiel d'impact : fort**

⇒ **Me focaliser plus sur l'axe d'identification optimale en boucle fermée que sur la commande prédictive**

- **Systèmes à étudier :**

- Instables
- MIMOMP
- Modélisés par **EDP**

- **Structure de commande et analyse :**

- **Perte d'observabilité/entrée persistante** : systèmes non uniformément observables
- **Robustesse** vis à vis des erreurs structurelles de modèle
- **Reconfiguration** en cas de capteur défaillant
- **Design des bornes des contraintes** sur les sorties

- **Aspects numériques :**

- **Paramétrisation de $u(t)$** dans une dimension plus grande

Collaborations en cours :

- Thèse de **Labbane** : printemps 2010-...
- **Équipe** SNLEP : observateur
- **Logiciel ODOE4OPE** : évolutions

Collaborations en gestation :

- Collaboration industrielle (issue de la valorisation de MPC@CB via LST) : dossier **CIFRE** déposé en avril 2011
- **Prof. Bhartiya (IITB)** : optimisation et génie procédés (demande à déposer)

- Me focaliser sur des problèmes complexes (à **modèle EDP**)
- Au LAGEP : **lyophilisateurs** de produits pharmaceutiques (EDP, non-linéarités, frontière interne variable, produit final à haute valeur ajoutée)
- Problèmes d'**efficacité énergétique** à traduire en des problèmes de conduite en ligne sous contraintes sur les mesures disponibles
- **Logiciel MPC@CB** : commercialisation, études sur des procédés réels (études plus fondamentales à réaliser)

Merci pour votre attention.

Ouverture des discussions avec le jury.

- Le coefficient d'absorption $\alpha_p(\cdot)$ dépend de la température de la surface supérieure (qui dépend, entre autres, de la commande) :

$$\alpha_p(\cdot) = \left\{ \int_0^\infty \text{ir}(\lambda) \alpha_p(\lambda, T_p(0, t)) d\lambda \right\} \cdot \frac{1}{\int_0^\infty \text{ir}(\lambda) d\lambda} \quad (19)$$

- et où l'irradiance spectrale $\text{ir}(\lambda)$ dépend de la longueur d'onde λ de l'émetteur, donc de la commande u : $\text{ir}(\lambda(u))$
- \Rightarrow Dans le modèle de prédiction,
 $\alpha_p(\cdot) = \alpha_p(u) = \alpha_p =$ valeur constante réglée a priori
(banque selon couleur réelle)

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Cuisson de peinture en poudre : résultats expérimentaux (essais A)

Influence : 1/ de la valeur du paramètre α_p modélisé (noir (o), moyen(\diamond), blanc (+)) et 2/ de l'horizon de prédiction sur la poursuite de trajectoire de température (face inférieure) :

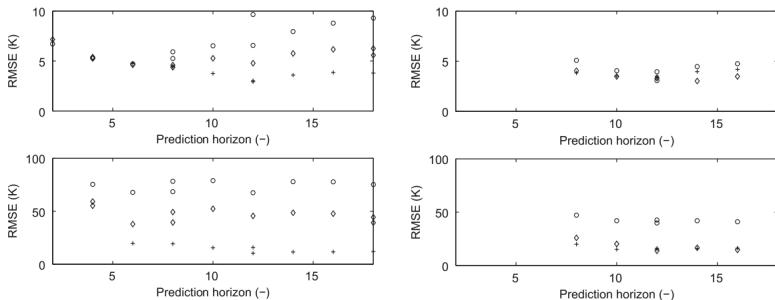
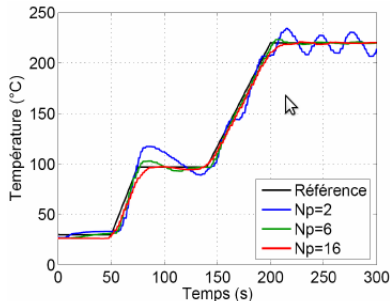
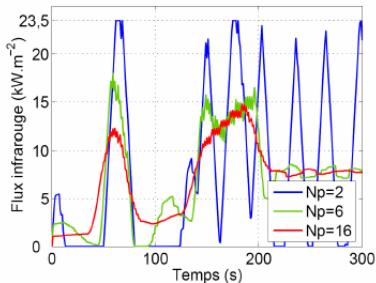


FIGURE: Erreur de poursuite moyenne (en haut) et erreur de modélisation moyenne (en bas), couleur réelle de la peinture (blanche (gauche) ou noire (droite)).

Bilan de l'axe de recherche "commande prédictive"

Cuisson de peinture en poudre : résultats expérimentaux (essais C)

Influence du réglage de l'horizon de prédiction sur la poursuite de trajectoire de température (face inférieure) :



Commande (gauche) et poursuite (droite).

⇒ Analyse : La poursuite est effective pour une référence donnée.