



**HAL**  
open science

# Synthèse d'un filtre de détection et isolation de défauts capteur pour les systèmes polytopiques LPV : application à un enrouleur de bandes

Mariem Sahnoun, Mickael Rodrigues, Jean-Christophe Ponsart, Didier  
Theilliol

## ► To cite this version:

Mariem Sahnoun, Mickael Rodrigues, Jean-Christophe Ponsart, Didier Theilliol. Synthèse d'un filtre de détection et isolation de défauts capteur pour les systèmes polytopiques LPV : application à un enrouleur de bandes. 7ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA 2012, Jul 2012, Grenoble, France. pp.CDROM. hal-00701101

**HAL Id: hal-00701101**

**<https://hal.science/hal-00701101>**

Submitted on 24 May 2012

**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.

# Synthèse d'un filtre de détection et isolation de défauts capteur pour les systèmes polytopiques LPV : application à un enrouleur de bandes

Mariam SAHNOUN<sup>1</sup>, Mickael RODRIGUES<sup>1</sup>, Jean-Christophe PONSART<sup>2</sup>, Didier THEILLIOL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés,  
UMR 5007 – Lyon1-Université, CNRS  
43, bd du 11 Novembre 1918. 69622 Villeurbanne, France.  
*sahnoun@lagep.univ-lyon1.fr, mickael.rodrigues@univ-lyon1.fr*

<sup>2</sup> Centre de Recherche en Automatique de Nancy  
UMR 7039 – Université de Lorraine, CNRS  
2, Avenue de la forêt de Haye. 54506 Vandœuvre, France.  
*Jean-Christophe.Ponsart@univ-lorraine.fr, didier.theilliol@univ-lorraine.fr*

*Résumé*— Dans ce papier, une méthode de diagnostic de défauts est développée pour une classe particulière de systèmes non linéaires décrits sous une forme polytopique Linéaire à Paramètres Variants (LPV). La contribution principale consiste en la synthèse d'un filtre de Détection et d'Isolation de Défauts (DID) capteur et aussi en l'estimation de l'amplitude de défauts avec un facteur de qualité. Les conditions de stabilité du filtre polytopique LPV sont étudiées en assurant la stabilité poly-quadratique avec les Inégalités Matricielles Linéaires (LMI). L'efficacité de cette méthode DID est illustrée sur un enrouleur de bandes.

*Mots-clés*— Système polytopique LPV, observateur, diagnostic, LMI.

## I. INTRODUCTION

Les systèmes industriels automatisés sont vulnérables aux défauts d'instrumentation comme les capteurs ou les actionneurs. Ce changement peut conduire à une situation dangereuse pour un opérateur humain [18]. La détection et l'isolation de défauts (DID) se résume à détecter l'apparition de défauts dans un processus et de trouver leurs causes avec différentes stratégies basées sur la connaissance de : modèles quantitatifs [20] et modèles qualitatifs [21]. Des modèles basés sur des techniques de DID sont envisagés pour contrôler le processus [4] et garantir la sécurité dans l'industrie. Plusieurs livres sont consacrés à ces sujets tels les références [10, 15] ou plus récemment [19]. Cependant, la DID pour les systèmes non linéaires reste un challenge en raison d'un problème de discrimination entre les perturbations et les défauts mais aussi dû à un large éventail de conditions d'exploitation. Une autre façon de faire du diagnostic sur des systèmes non linéaires est d'étudier les systèmes linéaires à paramètres variants (LPV) [3]. La DID pour les systèmes LPV a été pris en compte par exemple dans [6], [2] et celui pour les systèmes singuliers LPV dans [8]. Récemment, différentes techniques ont permis de générer des résidus insensibles aux défauts par des méthodes spécifiques de découplage [5]. Ces auteurs ont établi une méthode de diagnostic de défauts capteur pour des systèmes non linéaires et ont développé des conditions de stabilité pour les observateurs à entrées inconnues (UIO) qui effectuent la détection et l'isolation de défauts. Cependant, aucune estimation du défaut n'a été

fournie. Dans [14], une autre méthode a été développée avec un filtre capable à la fois d'isoler et d'estimer les défauts. Toutefois, les conditions de stabilité n'ont pas été étudiées et le filtre ne peut pas être utilisé sans une réelle étude de stabilité. Dans [17], les conditions de stabilité quadratique d'un filtre polytypique LPV qui permet la détection, l'isolation et l'estimation de défauts actionneur dans le cadre des multi-modèles ont été présentées.

En utilisant ces considérations, ce papier contribue à étendre et à développer un schéma de diagnostic complet avec : la détection, l'isolation et l'estimation mais pour des défauts capteur sur des systèmes non linéaires dont les matrices d'état sont sous une forme polynomiale. Les objectifs de cette étude sont de concevoir un schéma global de DID permettant de détecter, isoler et estimer l'amplitude de multiples défauts capteur mais aussi d'avoir une information qualitative supplémentaire de l'estimation du défaut qui n'est pas possible avec l'UIO présenté dans [5]. De plus, les conditions de stabilité de ce filtre polytopique LPV sont étudiées à travers la stabilité poly-quadratique en utilisant les LMI et ses performances sont testées sur un véritable processus : un enrouleur de bandes.

Le papier est organisé comme suit : dans la section II, la problématique est présentée. La Section III définit la synthèse du module de diagnostic pour les défauts capteur sous une représentation LPV afin d'estimer les multiples défauts capteur. L'étude des conditions de stabilité est abordée en utilisant les LMI. La Section IV illustre l'application de la méthode développée sur l'enrouleur de bandes. Enfin, la section V est consacrée aux conclusions.

## II. PROBLÉMATIQUE

Considérons une classe de systèmes LPV affines avec des défauts capteur :

$$\begin{cases} x_{k+1} = \tilde{A}(\theta_k)x_k + \tilde{B}(\theta_k)u_k \\ y_k = Cx_k + Ff_k \end{cases} \quad (1)$$

où  $x_k \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur d'état,  $u_k \in \mathbb{R}^p$  est la commande et  $y_k \in \mathbb{R}^m$  représente le vecteur de la sortie mesurée.  $F$  représente la matrice de distribution de défauts

capteur et  $f_k$  est le vecteur des défauts.  $\tilde{A}(\cdot), \tilde{B}(\cdot)$  sont des fonctions qui dépendent de manière affine du vecteur à paramètres variants dans le temps  $\theta_k \in \mathbb{R}^l$ . Il est également supposé que chaque composante  $\theta_k^j$  de ce vecteur est sans défaut, bornée, et se trouve dans un hypercube [7] de telle sorte que  $\forall j \in [1, \dots, l]$  :

$$\theta_k \in \Gamma = \{\theta_k \mid \underline{\theta}_k^j \leq \theta_k^j \leq \bar{\theta}_k^j\}, \quad \forall k \geq 0 \quad (2)$$

Le système (1) avec une dépendance affine du paramètre  $\theta_k$  (2), permet de déterminer un ensemble de matrices  $\Xi(\theta_k)$  telles que :

$$\Xi(\theta_k) = \Xi_0 + \sum_{j=1}^l \theta_k^j \Xi_j, \quad \forall \theta_k \in \Gamma \quad (3)$$

où

$$\Xi = \begin{pmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ C & F \end{pmatrix} \quad (4)$$

Le système (1) peut être transformé sous une forme d'interpolation convexe des sommets de  $\Gamma$  où les sommets du polytope sont définis de telle sorte que [18] :  $S_j = [A_j, B_j, C, F]$ ,  $\forall j \in [1, \dots, N]$  où  $N = 2^l$ . Les coordonnées polytopiques sont calculées par  $\rho(\theta(k))$  et varient dans l'ensemble convexe  $\Lambda$  :

$$\Lambda = \{\rho(\theta_k) \in \mathbb{R}^N, \rho(\theta_k) = [\rho_1(\theta_k), \dots, \rho_N(\theta_k)]^T, \quad (5)$$

$$\rho_j(\theta_k) \geq 0, \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k) = 1\}$$

Par conséquent et en considérant des défauts capteur, le système polytopique LPV est donné par :

$$\begin{cases} x_{k+1} = \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k)(A_j x_k + B_j u_k) \\ y_k = C x_k + F f_k \end{cases} \quad (6)$$

où  $A_j \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B_j \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$  et  $F \in \mathbb{R}^{m \times q}$  sont des matrices invariantes définies pour le  $j^{\text{th}}$  modèle. Dans [17], les auteurs ont considéré les défauts actionneur et dans ce papier, les défauts capteur vont être considérés. Un travail préliminaire consiste à réécrire le système (6) avec des défauts capteur en un système avec des pseudos défauts actionneur sur la représentation d'état. Basé sur [12], un pseudo-défaut  $\bar{f}_k$  peut être défini de la façon suivante :

$$f_{k+1} = \delta f_k + \bar{f}_k \quad (7)$$

où  $\delta \in \mathbb{R}^{q \times q}$  est défini par :  $\delta = \text{diag}(\delta_1, \dots, \delta_q)$  pour  $0 < q \leq m$ . En considérant (6) et (7), une nouvelle représentation du système polytopique LPV avec défaut capteur est donnée par :

$$\begin{cases} \bar{x}_{k+1} = \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k)(\bar{A}_j \bar{x}_k + \bar{B}_j u_k + \bar{F} \bar{f}_k) \\ \bar{y}_k = \bar{C} \bar{x}_k \end{cases} \quad (8)$$

avec  $\bar{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ f_k \end{bmatrix}$ ,  $\bar{A}_j = \begin{bmatrix} A_j & \underline{0} \\ \underline{0} & \delta \end{bmatrix}$ ,  $\bar{B}_j = \begin{bmatrix} B_j \\ \underline{0} \end{bmatrix}$ ,  $\bar{F} = \begin{bmatrix} \underline{0} \\ I \end{bmatrix}$ ,  $\bar{C} = [C \ F]$  ( $\underline{0}$  désigne la matrice nulle et  $I$  la matrice identité de dimensions appropriées). Afin de fournir une détection et une isolation efficaces de défauts, la synthèse d'un résidu découplé du défaut capteur est fournie

par le filtre polytopique LPV. Sous les hypothèses que les conditions nécessaires de l'existence d'un filtre polytopique LPV soient remplies :

- le nombre de mesures est supérieur au nombre de défauts i.e  $q \leq m$  (à des fins de détection des défauts).
- la matrice de distribution de défaut  $\bar{F}$  est de plein rang colonne i.e :  $\text{rang}(\bar{F}) = q$ .

### III. DÉTECTION, ISOLATION ET ESTIMATION DE DÉFAUTS CAPTEUR

#### A. Conception du filtre polytopique LPV

Sous l'hypothèse que les paires  $(\bar{C}, \bar{A}_j)$  soient observables, un algorithme conventionnel de détection de défauts est capable de détecter le défaut en surveillant le résidu ( $r_k = \bar{y}_k - \hat{\bar{y}}_k$  où  $\hat{\bar{y}}_k$  définit la sortie estimée). Afin de déterminer également l'estimation de l'amplitude du défaut et d'estimer le vecteur de l'espace d'état, les auteurs de [17] ont proposé de concevoir un filtre tel que le vecteur résiduel  $r_k$  soit divisé en deux parties distinctes : une partie du résidu est définie sensible aux défauts et l'autre partie  $y$  est insensible. Ainsi, le filtre polytopique LPV est défini par :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k)(\bar{A}_j \hat{x}_k + \bar{B}_j u_k + \bar{K}_j(\bar{y}_k - \bar{C} \hat{x}_k)) \\ \hat{y}_k = \bar{C} \hat{x}_k \end{cases} \quad (9)$$

ou également avec la notation  $(\cdot)(\rho_k) = \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k)(\cdot_j)$  comme :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \bar{A}(\rho_k) \hat{x}_k + \bar{B}(\rho_k) u_k + \bar{K}(\rho_k)(\bar{y}_k - \bar{C} \hat{x}_k) \\ \hat{y}_k = \bar{C} \hat{x}_k \end{cases} \quad (10)$$

où  $\hat{x}$  et  $\hat{y}$  représentent respectivement l'état estimé et la sortie estimée, et  $\bar{K}(\rho_k)$  est la matrice gain du filtre défini comme suit :

$$(\bar{A}(\rho_k) - \bar{K}(\rho_k) \bar{C}) \bar{F} = 0 \quad (11)$$

Si l'équation (11) est satisfaite et si le nombre de défauts est strictement inférieur aux nombres de sorties à des fins d'isolation de défauts i.e.  $\text{rang}(\bar{C} \bar{F}) = q < m$ , une solution de (11) a été proposée par [11] dont le gain  $\bar{K}(\rho_k)$  était paramétré de telle sorte que :

$$\bar{K}(\rho_k) = K^A(\rho_k) + K^C(\rho_k) \quad (12)$$

où :

- $K^A(\rho_k)$  est défini par :

$$K^A(\rho_k) = \omega(\rho_k) \Pi \quad (13)$$

avec  $\omega(\rho_k) = \bar{A}(\rho_k) \bar{F}$  et  $\Pi = (\bar{C} \bar{F})^+$ .

- $K^C(\rho_k)$  est défini par :

$$K^C(\rho_k) = K(\rho_k) \Psi \quad (14)$$

avec  $\Psi = \beta(I_m - (\bar{C} \bar{F})(\bar{C} \bar{F})^+)$ ,  $\beta \in \mathbb{R}^{(m-q) \times m}$  est une matrice constante arbitraire définie de sorte que la matrice  $\Psi$  soit de plein rang et  $K(\rho_k)$  est un gain à synthétiser.

Basé sur (13) et (14), le filtre défini dans (10) peut être réécrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = (\mathcal{A}(\rho_k) - K(\rho_k) \bar{C}) \hat{x}_k + \bar{B}(\rho_k) u_k + K^A(\rho_k) \bar{y}_k + K(\rho_k) \Psi \bar{y}_k \\ \hat{y}_k = \bar{C} \hat{x}_k \end{cases} \quad (15)$$

avec  $\mathcal{A}(\rho_k) = \bar{A}(\rho_k)(I_m - \bar{F}\Pi\bar{C})$  et  $\mathcal{C} = \Psi\bar{C}$ .

Selon (8) et (15), l'erreur d'estimation  $e_k = \bar{x}_k - \hat{x}_k$  (notée  $\bar{e}_k$  dans le cas sans défaut i.e :  $\hat{f}_k = 0$ ) est donnée par :

$$\bar{e}_{k+1} = (\mathcal{A}(\rho_k) - K(\rho_k)\mathcal{C})\bar{e}_k \quad (16)$$

où  $K(\rho_k)$  doit être synthétisé afin de garantir la stabilité du filtre polytopique LPV et la convergence de l'erreur d'estimation (16). Bien évidemment, la synthèse de ce gain sera conditionnée par un choix approprié des valeurs propres du système afin de garantir une vitesse de convergence adéquate. Puisque nous avons supposé les paires  $(\bar{C}, \bar{A}_j)$  observables, nous pourrions par exemple contraindre les valeurs propres du filtre à appartenir à une zone précise du plan complexe en ajoutant des contraintes sur les LMI (Voir par exemple [18]). De plus, la décomposition du gain (12) implique les propriétés des matrices suivantes [11] :

$$\Pi\bar{C}\bar{F} = I \text{ et } \Psi\bar{C}\bar{F} = 0 \quad (17)$$

et rend possible la génération d'un nouveau vecteur de résidus tel que :

$$p_k = \begin{bmatrix} \Psi \\ \Pi \end{bmatrix} r_k = \begin{bmatrix} \Psi\bar{r}_k \\ \Pi\bar{r}_k + \bar{f}_{k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_k \\ \Omega_k \end{bmatrix} \quad (18)$$

Le résidu dans le cas sans défaut est noté  $\bar{r}_k$  et est proche de zéro. Il faut noter que  $\gamma_k \in \mathbb{R}^{m-q}$  qui est le résidu insensible aux défauts est utilisé comme facteur de qualité. C'est un indicateur efficace pour la qualité du filtre polytopique LPV contre les erreurs de modélisation et d'autres vecteurs de défauts qui ne sont pas pris en compte dans la synthèse. En effet, si un défaut survient dans le système, une technique d'évaluation de résidus doit être utilisée afin d'indiquer la précision du vecteur résiduel projeté  $p_k$  et plus précisément, la précision de la dernière composante  $\Omega_k = \Pi\bar{r}_k + \bar{f}_{k-1}$ . En ce qui concerne la composante  $\Omega_k \in \mathbb{R}^q$  qui représente le résidu sensible aux défauts, celle-ci peut être utilisée pour une estimation du défaut  $\hat{f}_k$ . Avec un temps de retard d'un seul échantillon et comme mentionné dans la Proposition 1 dans [17] pour les défauts actionneurs, une estimation  $\hat{f}_k$  du défaut capteur  $\bar{f}_k$  pourrait être réalisée grâce à une matrice de Moore-Penrose :

$$\hat{f}_k = (\bar{F})^+ \bar{F}\Omega_k \quad (19)$$

où  $(\bar{F})^+$  est la pseudo-inverse de la matrice  $\bar{F}$ .

### B. Stabilité du Filtre Polytopique LPV

Le problème de stabilité est réduit à trouver des gains  $K_j$ ,  $\forall j \in [1, \dots, N]$  de sorte que l'interpolation de gain  $K(\rho_k)$  assure la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation (16) vers l'origine dans le cas sans défaut. Pour obtenir des conditions de synthèse moins restrictives, la notion de la stabilité poly-quadratique avec la fonction de Lyapunov quadratique dépendant d'un paramètre tel que mentionné dans [7] va être utilisée.

*Proposition 1* : L'erreur d'estimation (16) est poly-quadratiquement stable s'il existe des matrices symétriques définies positives  $P_j$ , des matrices  $R_j$  et  $G$  de dimensions appropriées  $\forall j \in [1, \dots, N]$  telles que :

$$\begin{pmatrix} -P_j & \mathcal{A}_j^T G - \mathcal{C}^T R_j^T \\ G\mathcal{A}_j - R_j\mathcal{C} & P_i - (G + G^T) \end{pmatrix} < 0, \forall i, j \in [1, \dots, N] \quad (20)$$

Le gain  $K_j$  est alors donné par  $K_j = G^{-1}R_j$ . ■

*Preuve :*

Soit la fonction de Lyapunov définie par  $V(\bar{e}_k, \rho_k) = \bar{e}_k^T P(\rho_k) \bar{e}_k > 0$ . Pour assurer la stabilité, sa différence  $\mathcal{L} = V(\bar{e}_{k+1}, \rho_{k+1}) - V(\bar{e}_k, \rho_k)$  le long de la solution de l'équation (16) doit être définie négative décroissante telle que :

$$(\mathcal{A}(\rho_k) - K(\rho_k)\mathcal{C})^T P(\rho_{k+1})(\mathcal{A}(\rho_k) - K(\rho_k)\mathcal{C}) - P(\rho_k) < 0 \quad (21)$$

avec  $\mathcal{A}(\rho_k) = \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k) \mathcal{A}_j$  et la matrice de Lyapunov

$$P(\rho_k) = \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k) P_j \text{ sur un ensemble convexe } \Lambda \text{ (5).}$$

Supposons que (20) soit vraie. En utilisant la notation  $R_j = GK_j$  et en multipliant les inégalités dans (20) par  $\sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k)$ , alors (20) devient  $\forall j \in [1, \dots, N]$  :

$$\begin{pmatrix} -\sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k) P_j & \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k) (\mathcal{A}_j - K_j \mathcal{C})^T G^T \\ G \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k) (\mathcal{A}_j - K_j \mathcal{C}) & P_i - (G + G^T) \end{pmatrix} < 0, \quad (22)$$

En utilisant les notations suivantes :

$$\begin{aligned} P(\rho_k) &= \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_k) P_j \\ P_+(\rho_k) &= P(\rho_{k+1}) = \sum_{j=1}^N \rho_j(\theta_{k+1}) P_j = \sum_{i=1}^N \rho_i(\theta_k) P_i \end{aligned} \quad (23)$$

et en additionnant les inégalités dans (22) par rapport à  $i$ , (22) devient :

$$\begin{pmatrix} -P(\rho_k) & (\mathcal{A}^T(\rho_k) - K(\rho_k)\mathcal{C})^T G^T \\ G(\mathcal{A}(\rho_k) - K(\rho_k)\mathcal{C}) & P_+(\rho_k) - (G + G^T) \end{pmatrix} < 0 \quad (24)$$

En multipliant la gauche de (24) par :  $[I \quad (\mathcal{A}(\rho_k) - K(\rho_k)\mathcal{C})^T]$  et la droite par :  $[I \quad (\mathcal{A}(\rho_k) - K(\rho_k)\mathcal{C})^T]^T$ , l'inégalité suivante est obtenue :

$$(\mathcal{A}(\rho_k) - K(\rho_k)\mathcal{C})^T P_+(\rho_k) (\mathcal{A}(\rho_k) - K(\rho_k)\mathcal{C}) - P(\rho_k) < 0 \quad (25)$$

En d'autres termes, l'inégalité (25) correspond à l'inégalité (21). Par conséquent, l'erreur d'estimation (16) satisfait à la condition de la stabilité poly-quadratique. □

## IV. L'ENROULEUR DE BANDES

### A. Description du système

Le processus d'enroulement dans le chapitre 3 de [9], est composé d'une toile en plastique et de trois bobines appelées respectivement bobines de dénouement, stimulation et de réenroulement avec un rayon non mesurable directement. Chaque bobine est couplée à un moteur à courant continu par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse.

La vitesse angulaire des deux premières bobines ( $S_1, S_2$ ) et les tensions ( $T_1, T_3$ ) entre les bobines, est mesurée par des tachymètres et des voltmètres. Les sorties sont les trois entrées de commande  $U_1, U_2$  et  $U_3$  des trois moteurs

comme illustré dans la figure 1. Chaque moteur est commandé par un contrôleur local composé d'un ou de deux régulateurs PI [14]. La première boucle de contrôle ajuste le courant du moteur ( $I_1, I_2, I_3$ ), et sa constante de temps d'intégration est d'environ 40 ms, tandis que la deuxième boucle contrôle la vitesse angulaire avec une constante de temps d'intégration égale à 200 ms. Les points de réglage de ces contrôleurs sont calculés par un contrôleur logique programmable (PLC) afin de contrôler à la fois les tensions et la vitesse linéaire de la bande (300 m longueur, 5 cm large et 0.2 mm d'épaisseur). Sous l'étude expérimentale spécifique qui dure 40 min, le rayon de réenroulement de la bobine varie de 210 à 70 mm. Un environnement de développement en temps réel (Simulink Real-Time Workshop+dSPACE) basé sur un ordinateur est utilisé à la place du PLC pour améliorer le contrôle. Les entrées et les sorties du système sont données dans l'intervalle  $[0 \text{ } 100\%]$  correspondant à  $[-10V ; 10V]$ .

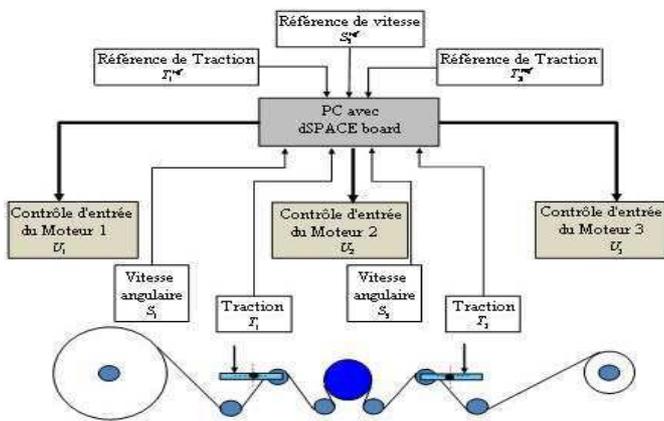


Fig. 1. Architecture de contrôle du processus

### B. La modélisation du système avec des défauts capteur

Le lecteur pourra retrouver l'essentiel de la modélisation dans [13] ainsi que de manière plus complète dans le chapitre 3 de [9] avec la représentation suivante :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A(R_k)x_k + B(R_k)u_k \\ y_k = Cx_k + Ff_k \end{cases} \quad (26)$$

où  $x_k = x(kT_e)$ , avec la période d'échantillonnage  $T_e = 0.1s$ ,  $y = x = [T_1 \ S_2 \ T_3]^T$  et  $u = [U_1 \ U_2 \ U_3]^T$ . La matrice du système  $A$  et la matrice de contrôle  $B$  sont des matrices linéaires polynomiales dépendant d'un paramètre positif borné et variant au cours du temps noté  $R_k$  où  $0 < R_{min} < R_k < R_{max}$  et vérifiant :

$$G(R) = G_0R^0 + G_1R^1 + G_2R^2 + \dots + G_\alpha R^\alpha \quad (27)$$

où  $G$  représente  $A$  ou  $B$  et  $\alpha$  définit le degré du polynôme. En utilisant la technique développée par [16] et [5] où chaque matrice polynomiale peut être définie par un polytope convexe avec  $(\alpha + 1)$  sommets, la représentation (26) peut se ramener à un système polytopique LPV augmenté :

$$\begin{cases} \bar{x}_{k+1} = \sum_{j=1}^{\alpha+1} \rho_j(R_k)(\bar{A}_j\bar{x}_k + \bar{B}_j u_k + \bar{F}\bar{f}_k) \\ \bar{y}_k = \bar{C}\bar{x}_k \end{cases} \quad (28)$$

où  $\bar{A}_j \in \mathbb{R}^{n \times n}$  et  $\bar{B}_j \in \mathbb{R}^{n \times p}$  sont des matrices constantes et les fonctions  $\rho_j$  résident dans un ensemble convexe  $\forall j \in$

$$[1, \dots, \alpha + 1] : \rho_j \geq 0, \sum_{j=1}^{\alpha+1} \rho_j(R) = 1 \text{ et}$$

$$0 < R_{min} < R_k < R_{max}.$$

Ici, la machine d'enroulement peut être représentée avec  $\alpha = 6$  dépendant du rayon de réenroulement de bobines  $R_k$  comme dans l'équation (28) avec  $0 < R_{min} < R_k < R_{max}$ ,  $R_{min} = 70mm$  et  $R_{max} = 210mm$ . Pour des raisons techniques, le rayon est estimé par l'équation suivante :

$$R_k = R_{k-1} + \frac{h}{2\pi} S_{1,k} \quad (29)$$

où  $h$  est l'épaisseur de la bande.  $S_{1,k}$  est la dépendance au temps de la vitesse angulaire de la bobine  $S_1$  et il est supposé qu'elle soit sans défaut comme mentionné par exemple dans le cadre LPV [7]. La figure (2) présente l'évolution des 7 fonctions de pondération des 7 modèles retenus durant l'expérimentation. Leurs évolutions dynamiques justifient pleinement l'utilisation d'un modèle de type LPV où les paramètres varient rapidement et de manière non linéaire.

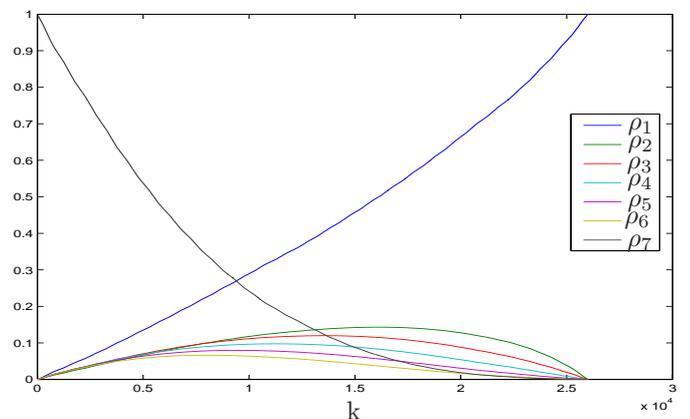


Fig. 2. Evolution des paramètres  $\rho_j$

Les défauts capteur peuvent survenir uniquement sur la sortie mesurée  $y = x = [T_1 \ S_2 \ T_3]^T$ . Notons qu'une loi de commande linéarisante des entrées-sorties, basée sur le modèle polynomial, a été implémentée (comme dans [9]) en utilisant le développement théorique de [1]. Ceci est essentiel, car ce système est instable en boucle ouverte.

### C. Les résultats expérimentaux

L'efficacité et les performances de la méthode DID développée est appliquée et un dispositif polytopique LPV généralisé est testé sur un processus réel. L'hypothèse de travail bien connu en diagnostic, est qu'il peut y avoir plusieurs défauts capteur mais pas aux mêmes instants.

En l'absence de défaut : La figure 3 montre l'évolution des sorties 2.a) en boucle ouverte avec les entrées 2.b) dans le cas où il n'y a pas de défaut. Cette expérience a été réalisée pour des changements progressifs de 20% de leurs valeurs d'exploitation correspondantes. Il faut noter que les résidus générés par le filtre de découplage représentés sur la figure 4 sont de moyenne nulle : cela signifie qu'il n'y a pas de défaut.

En présence de défaut : L'idée est de synthétiser un filtre pour tous les défauts capteur donc avec  $F = I_3$ . Toutefois, la condition du découplage qui est :  $\text{rang}(\bar{C}\bar{F}) = q = 3 < m$  (voir équation (11) et les conditions de rang

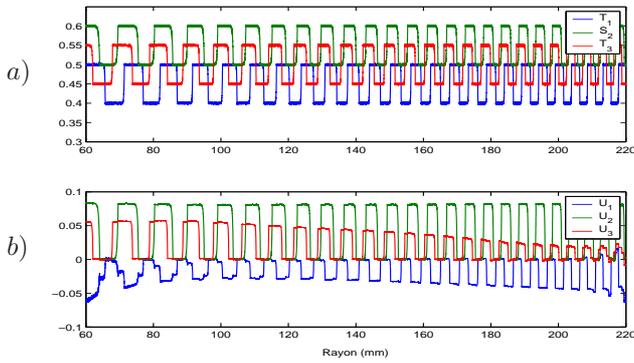


Fig. 3. En l'absence de défaut : a) Les sorties du système b) Les entrées du système

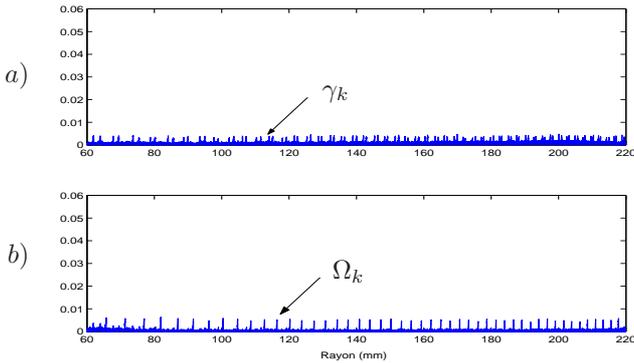


Fig. 4. Norme du vecteur résiduel en l'absence de défaut : a) Norme des résidus insensibles aux défauts capteur b) Norme des résidus sensibles aux défauts capteur

associées) n'est pas vérifiée car le nombre de défauts  $q$  est égal au nombre de sorties  $m = 3$ . De ce fait et afin d'évaluer la méthode, un banc de filtres polytopiques LPV a été développé afin de détecter, isoler et estimer les défauts capteur. Chacun de ces filtres est dédié à un seul et unique capteur.

\* *Première expérimentation* : un défaut sur la tension  $T_1$  qui survient et disparaît à différents moments va être considéré. Dans l'équation (26), en prenant  $F = F_1 = [1 \ 0 \ 0]^T$ , les conditions de rang sont alors vérifiées.

Dans la figure 5.a), il est facile de voir que la sortie  $T_1$  est différente du régime nominal dû à la présence de défauts. La sortie réelle est différente de l'entrée de référence pour des valeurs de rayon autour de : 100, 170 et 215mm.

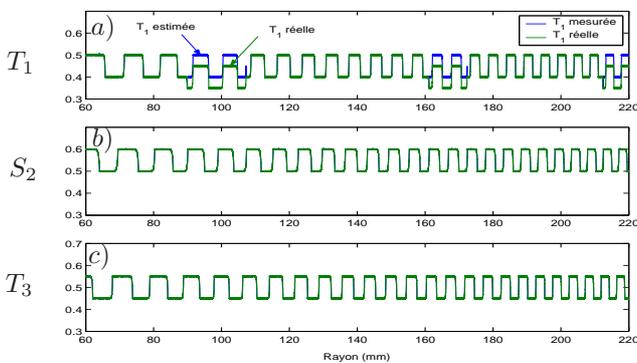


Fig. 5. Sorties du système en présence de défaut et son estimation

Les résultats du filtre de découplage sont présentés dans la figure 6 qui montre dans la figure 6.b) le comportement

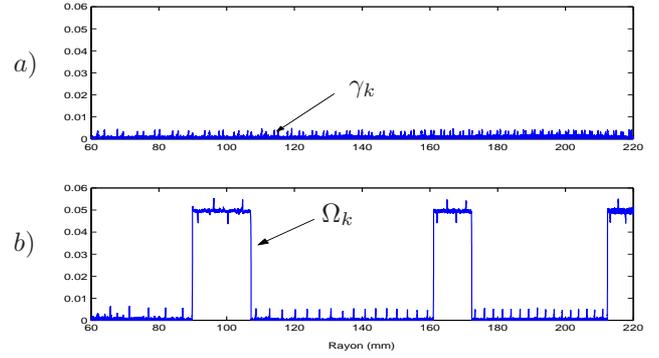


Fig. 6. En présence de défauts : a) Norme des résidus insensibles aux défauts capteur b) Norme des résidus sensibles aux défauts capteur

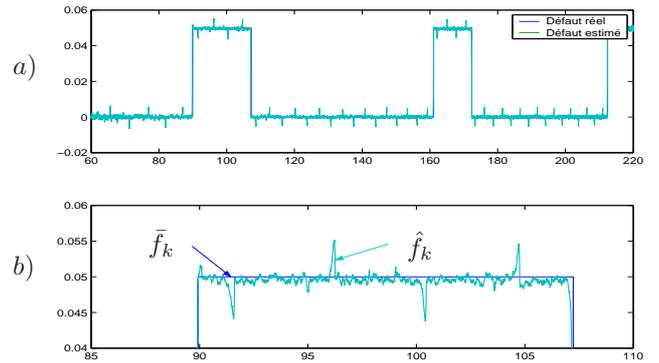


Fig. 7. a) Le défaut capteur et son estimation par le filtre polytopique LPV b) Zoom autour  $R \approx 100mm$

du résidu sensible  $\Omega_k$  où les brusques changements correspondent au défaut capteur sur  $T_1$ . Dans la figure 6.a), il est clair que le facteur de qualité  $\gamma_k$  est égal à zéro signifiant que l'estimation du défaut dérivé du vecteur du résidu sensible peut être utilisée pour estimer le défaut réel. L'estimation précise l'amplitude du défaut capteur sur la figure 7 et illustre la performance du filtre de découplage. La présence de petits 'pics' sur la figure 7 s'explique par l'allure des entrées dans la figure 3.b) mais aussi par le retard à la détection de 1 échantillon du filtre (Voir [11] pour plus de détail pour ce retard).

\* *Deuxième expérimentation* : Maintenant, un défaut capteur sur la bobine  $S_2$  va être considéré. Mais, afin de souligner l'importance de la valeur du résidu insensible appelé aussi facteur de qualité, le même filtre (dédié précédemment au défaut capteur sur  $T_1$ ) va être utilisé comme dans la première expérimentation. Donc, ce n'est pas le filtre adapté pour le défaut capteur sur  $S_2$  et bien sûr, l'estimation du défaut capteur ne sera pas bonne. La matrice de distribution de défaut  $F$  de l'équation (26) est dans ce cas :  $F = F_2 = [0 \ 1 \ 0]^T$ .

Dans la figure 8, il est clair que la sortie réelle  $S_2$  est différente de celle mesurée. La figure 9 présente le comportement des deux résidus du filtre polytopique LPV. Le résidu insensible  $\gamma_k$  dans la figure 9.a) n'est pas égale à zéro, ce qui signifie que le résidu sensible  $\Omega_k$  sur la figure 9.b) ne peut pas être utilisé pour estimer correctement le défaut. Ainsi dans la figure 10, l'estimation du défaut capteur de  $S_2$  n'est pas bonne. Dans ce cas, l'information supplémentaire fournie par ce filtre est qu'il y a un autre défaut dans la

machine. Par conséquent, le filtre a la possibilité de fournir un indicateur de qualité associé à son estimation. Une telle information est une clé importante dans les systèmes tolérants aux défauts [9].

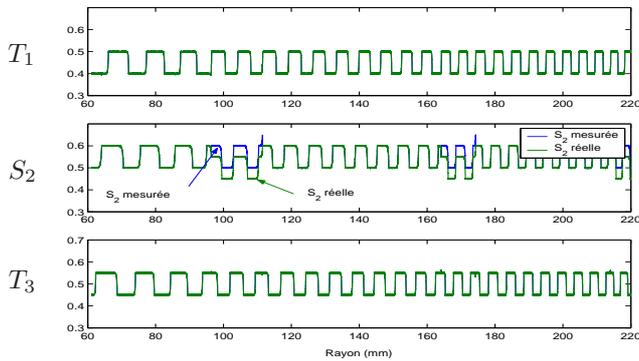


Fig. 8. Sorties du système en cas de défaut et son estimation

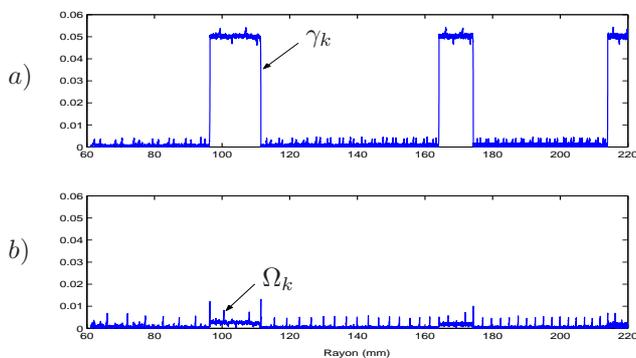


Fig. 9. En présence de défauts : a) Norme du résidu insensible au défaut capteur b) Norme du résidu sensible au défaut capteur

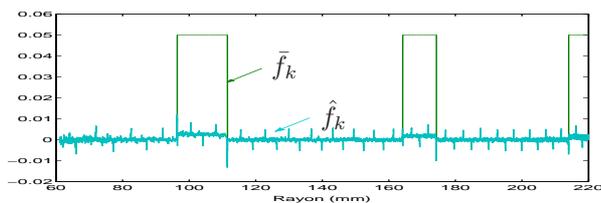


Fig. 10. Le défaut capteur et son estimation par le filtre polytopique LPV

L'avantage principal de ce filtre polytopique LPV n'est pas seulement la performance de l'estimation du défaut capteur mais aussi la capacité à générer une information qualitative supplémentaire à partir du résidu insensible : si le facteur de qualité  $\gamma_k$  n'est pas égal à zéro, cela signifie qu'il est corrompu par un autre défaut ou par des erreurs de modélisation. De ce fait, le filtre ne peut pas être utilisé pour estimer correctement une amplitude d'un défaut capteur.

## V. CONCLUSION

Dans ce papier, une approche générale sur le diagnostic des défauts capteur conçue pour les systèmes polytopiques LPV a été proposée. Cette méthode a été développée en utilisant un filtre polytopique LPV conçu pour détecter, isoler et estimer de multiples défauts capteur à travers une

représentation polytopique. Pour garantir la stabilité de ce filtre, une analyse a été réalisée en utilisant des LMI. L'efficacité et les performances du filtre polytopique LPV ont été démontrées sur un processus réel : un enrouleur de bandes.

## RÉFÉRENCES

- [1] Isidori A. *Nonlinear Control Systems*. (3e Edition), Springer, 1995.
- [2] S. Armeni, A. Casavola, and E. Mosca. Robust fault detection and isolation for lpv systems under a sensitivity constraint. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 23 :55–72, 2009.
- [3] J. Bokor and G. Balas. Detection filter design for LPV systems : a geometric approach. *Automatica*, 40 :511–518, 2004.
- [4] Knittel D., Laroche E., Gigan D., and Koc H. Tension control for winding systems with two degrees of freedom h-infinity controller. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(1) :113–120, 2003.
- [5] Theilliol D., Ponsart J.-C., Rodrigues M., Aberkane S., and Yamé J. Design of sensor fault diagnosis method for nonlinear systems described by linear polynomial matrices formulation : application to a winding machine. In *Proceedings of the 17th World Congress, IFAC08*, Seoul, Korea, 2008.
- [6] Zolghadri A. et Henry D. et Grenaille S. Fault diagnosis for lpv systems. In *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Ajaccio, 2008.
- [7] Anstett F., Millerioux G., and Bloch G. Polytopic observer design for lpv systems based on minimal convex polytope finding. *Journal of Algorithms and Computational Technology*, 3 :23–43, 2009.
- [8] Hamdi H., Rodrigues M., Mechmeche C., Theilliol D., and Ben-Hadj Braiek N. Fault detection and isolation in linear parameter-varying descriptor systems via proportional integral observer. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, pages 2–16, 2011.
- [9] Noura H., Theilliol D., Ponsart J.-C., and Chamseddine A. *Fault-Tolerant Control Systems : Design and Practical Applications*. Springer, 2009.
- [10] Chen J. and Patton R.J. *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [11] Keller J. Fault isolation filter design for linear stochastic systems. *Automatica*, 35, 1999.
- [12] Park J., Rizzoni G., and Ribbens WB. On the representation of sensor faults in fault detection filters. *Automatica*, 30(11) :1793–1795, 1994.
- [13] Ponsart J.-C. and Theilliol D. Actuator fault diagnosis of a nonlinear system : the winding process. In *11e IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, Nancy, France, 2004.
- [14] Ponsart J.-C., Theilliol D., and Aubrun C. Virtual sensors design for active fault tolerant control system applied to a winding machine. *Control Engineering Practice*, pages 1037–1044, 2010.
- [15] Gertler J.J. *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. NYBasel HK : Marcel Dekker, Inc, 1998.
- [16] Hetel L., Daafouz J., and Jung C. Lmi control design for a class of exponential uncertain systems with application to network controlled switched systems. In *ACC2007*, New York City, USA, CD Rom, 2007.
- [17] Rodrigues M., Theilliol D., Adam-Medina M., and Sauter D. A fault detection and isolation scheme for industrial systems based on multiple operating models. *Control Engineering Practice*, 16(2) :225–239, 2008.
- [18] Rodrigues M., Theilliol D., Aberkane S., and Sauter D. Fault tolerant control design for polytopic lpv system. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 17, 1 :27–37, 2007.
- [19] Ding SX. *Model-based fault diagnosis techniques design schemes, algorithms and tools*. Springer, 2008.
- [20] Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., and Kavuri SN. A review of process fault detection and diagnosis. part1 : Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3) :293–311, 2003a.
- [21] Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., and Kavuri SN. A review of process fault detection and diagnosis. part2 : Qualitative models-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3) :313–326, 2003b.