

Diagnostic des systèmes à commutation, approche par la méthode de l'espace de parité

Elom Ayih DOMLAN, Didier MAQUIN, José RAGOT

Centre de Recherche en Automatique de Nancy, UMR CNRS 7039
Institut National Polytechnique de Lorraine,
2, avenue de la forêt de Haye,
54516 Vandœuvre-lès-Nancy, France

{eadomlan, dmaquin, jragot}@ensem.inpl-nancy.fr

Résumé— La majeure partie des processus industriels présente un mode de fonctionnement hybride par nature compte tenu du fait que leur représentation passe par la combinaison de modèles prenant en compte la dynamique discrète et la dynamique continue. Les multi-modèles et les modèles hybrides sont bien adaptés pour la représentation de tels systèmes. Dans diverses situations, les instants de changement de régime de fonctionnement ne sont pas a priori connus. Cet article traite de la détection des instants de passage d'un modèle de fonctionnement à l'autre et de la mise en évidence du modèle actif à chaque instant. Il est fait usage de la génération de résidus en s'inspirant de la très répandue méthode de l'espace de parité.

Mots-clés— changement de régime, espace de parité, commutation, multi-modèle, système hybride.

I. INTRODUCTION

La modélisation de systèmes complexes conduit généralement à l'obtention de modèles non-linéaires dont la dynamique est influencée à la fois par des événements discrets et des événements continus. Les multi-modèles ou les modèles hybrides ont prouvé leur efficacité quant à la représentation de tels processus. Les multi-modèles [1, 9, 14, 15] partent du principe qu'il est toujours possible de modéliser un système complexe par des modèles plus simples, souvent des modèles linéaires, en affectant chaque modèle à une zone de fonctionnement du système. On obtient alors des modèles locaux valables dans des régions de fonctionnement bien déterminées et qui sont reliés les uns aux autres par des mécanismes d'interpolation ou de commutation. On arrive ainsi à prendre en compte le comportement global du système en essayant de l'approcher par une modélisation locale qui n'est valable qu'autour d'un certain point de fonctionnement. Quant aux modèles hybrides, ils caractérisent des processus physiques régis par des équations différentielles qui montrent un comportement discontinu. Que ce soit les multi-modèles ou les modèles hybrides, une classe particulière mais importante de systèmes est obtenue en supposant que la relation entre les différents modèles locaux est effectuée par une fonction abrupte, de type fonction porte, ou que la dynamique entre les événements discrets est linéaire. On obtient ainsi la classe des systèmes linéaires par morceaux ou encore celle des systèmes à commutation. Cette classe de modèles est largement utilisée car les outils d'analyse et de commande pour les systèmes linéaires

sont très développés [10] et aussi parce qu'une grande partie des processus réels peut être représentée par des modèles issus de cette classe. Les recherches récentes sur les systèmes à commutation sont essentiellement concentrées dans les domaines de la modélisation, de la conception de loi de commande et d'étude de la stabilité. Toutefois, pour la mise en oeuvre de tous ces outils, il est indispensable de connaître le modèle local actif à l'instant courant ainsi que les instants de changement de régime du système. Très peu de publications ont porté sur ce difficile problème [3–5, 11–13, 16, 17]. De même, on retrouve une littérature très riche dans le domaine de la détection et de l'isolation de défauts des systèmes linéaires ou non linéaires [2, 6, 7] alors que le cas des systèmes à commutation a été peu traité. Nous proposons, dans cet article, une méthode pour la détermination, à chaque instant, du modèle local actif pour les systèmes à commutation et pour l'estimation des instants de commutation entre deux modèles locaux. Le second paragraphe est consacré à un rappel succinct de la méthode de l'espace de parité pour les systèmes linéaires. Le troisième paragraphe présente l'application de cette méthode aux systèmes à commutation et apporte des compléments quant aux extensions de la technique mise en oeuvre. Le quatrième paragraphe expose quelques résultats issus d'exemples académiques.

II. LA MÉTHODE DE L'ESPACE DE PARITÉ

Nous exposons dans cette section la méthode de l'espace de parité telle qu'elle est appliquée à un système dynamique linéaire à temps invariant classique. Le lecteur pourra consulter [2, 6, 7] pour plus de détails sur la méthode de l'espace de parité. Considérons le système linéaire défini par l'équation (1) :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_u u(k) + B_d d(k) + B_f f(k) \\ y(k) = Cx(k) + D_u u(k) + D_d d(k) + D_f f(k) \end{cases} \quad (1)$$

Dans le modèle de l'équation (1) les entrées sont de trois types :

- l'entrée connue déterministe $u(k)$,
- les perturbations $d(k)$ qui sont des entrées déterministes inconnues,
- les défauts $f(k)$ qui sont des entrées déterministes inconnues.

En accumulant les mesures de la sortie du système sur un horizon de taille h , on obtient le vecteur $Y_k = (y_{k-h+1}^T \cdots y_k^T)^T$. On définit de façon identique les matrices U_k , D_k , F_k respectivement pour l'entrée connue déterministe $u(k)$, les perturbations $d(k)$ et les défauts $f(k)$. Par le biais de l'équation (1) et en procédant à des substitutions répétées, on obtient aisément l'équation (2) :

$$Y_k - T_u U_k = O x_{k-h+1} + T_d D_k + T_f F_k \quad (2)$$

Dans l'équation (2), la matrice O représente la matrice d'observabilité du système et les matrices T_u , T_d et T_f sont des matrices de Toeplitz définies à l'équation (3).

$$T = \begin{pmatrix} D & 0 & \cdots & 0 \\ CB & & & \\ & \ddots & \ddots & 0 \\ CA^{h-2}B & & CB & D \end{pmatrix} \quad (3)$$

avec $T \in \{T_u, T_d, T_f\}$ et $D \in \{D_u, D_d, D_f\}$.

Pour générer un résidu, il faut déterminer une matrice de projection Ω , appelée matrice de parité, satisfaisant à :

$$\Omega \begin{pmatrix} O & T_d \end{pmatrix} = 0, \quad (4)$$

l'existence de Ω étant lié au rang de la matrice $\begin{pmatrix} O & T_d \end{pmatrix}$. Le résidu est alors obtenu sous deux formes :

- une forme permettant son calcul numérique à partir des variables connues u et y :

$$r_k = \Omega (Y_k - T_u U_k) \quad (5)$$

- et une forme évaluation qui explique l'influence des défauts sur ce résidu :

$$r_k = \Omega (T_f F_k) \quad (6)$$

En l'absence de perturbations et de défauts, les résidus sont nuls. Tout écart du résidu par rapport à zéro est expliqué par la présence de défauts si l'effet des perturbations peut être négligé. On arrive à localiser les défauts en procédant à une structuration des résidus en leur donnant des directions privilégiées en fonction des défauts. En pratique, les résidus sont toujours influencés par la présence de bruits de mesures et ne sont donc jamais totalement nuls. Il faut donc les analyser de façon statistique afin de détecter la présence des changements et d'en estimer l'amplitude.

III. APPLICATION DE LA MÉTHODE DE L'ESPACE DE PARITÉ AUX SYSTÈMES À COMMUTATION

A. Modèle du système

Les représentations multi-modèles permettent de prendre en compte les différents modes de fonctionnement des systèmes à commutation. Pour représenter la commutation d'un modèle local à l'autre, les fonctions d'interpolation ne sont pas des fonctions « douces », comme dans le cas classique, mais des fonctions abruptes de type fonction porte. De plus, nous supposons que les changements de modes de fonctionnement du système se reflètent entièrement dans la matrice de transition du système qui change en prenant

ses valeurs dans un ensemble fini de matrices. Cette hypothèse n'est pas très restrictive, car la méthode que nous proposons peut être aisément étendue à des systèmes pour lesquels la matrice de transition ainsi que celles d'entrée et ou de sortie changent de valeur. Afin d'alléger la présentation, nous considérons que les modèles locaux ne sont soumis qu'à des perturbations. L'équation (7) est le modèle adopté dans cet article pour la représentation des systèmes à commutation :

$$\begin{cases} x(k+1) = A_i x(k) + B_u u(k) + B_d d(k) \\ y(k) = C x(k) + D_u u(k) + D_d d(k) \end{cases} \quad (7)$$

$$A_i \in \{A_1, A_2, \dots, A_q\}, \quad q \in \mathbb{N}^* \setminus 1$$

Les vecteurs $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^r$, $d \in \mathbb{R}^p$ et $y \in \mathbb{R}^m$ sont respectivement les vecteurs d'état, d'entrée, de perturbation et de sortie du système. Notons aussi que nous ne formulons aucune hypothèse sur l'origine des commutations qui peuvent être inhérentes au système (par exemple lorsque l'amplitude de la commande dépasse un seuil) ou être dues à des événements externes au système (intervention d'un opérateur humain par exemple).

B. Détermination du modèle en cours et des instants de commutation

Pour appliquer la méthode de l'espace de parité aux systèmes à commutation, nous allons reprendre le développement fait dans la section II dans le cadre des systèmes dynamiques linéaires à temps invariant en y incluant l'information d'éventuel changement de régime de fonctionnement du système à tout instant. Considérons les matrices suivantes :

$$O_l^{k,h} = \begin{pmatrix} C \\ CA_{i_{k-h,l}} \\ \vdots \\ C \underbrace{A_{i_{k-1,l}} A_{i_{k-2,l}} \cdots A_{i_{k-h,l}}}_h \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$T_l^{k,h} = \begin{pmatrix} D & 0 \\ CB & 0 \\ \vdots & \\ C \underbrace{A_{i_{k-1,l}} \cdots A_{i_{k-h+1,l}}}_{h-1} B & C \underbrace{A_{i_{k-1,l}} \cdots A_{i_{k-h+2,l}}}_{h-2} B \\ \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & CB & CD \end{pmatrix} \quad (9)$$

avec $T_l^{k,h} = \left\{ \left(T_l^{k,h} \right)_u, \left(T_l^{k,h} \right)_d \right\}$.

Les matrices $\left(T_l^{k,h} \right)_u$ et $\left(T_l^{k,h} \right)_d$ relatives aux commandes et aux perturbations sont construites en remplaçant D et B par D_u et B_u , d'une part, et par D_d et B_d , d'autre part. La valeur de l'indice $i_{p,l}$ des matrices d'état dans les équations (8) et (9) est liée à l'instant considéré p dans la fenêtre d'observation et à la séquence de commutation en cours

| | | | | |
|-----------|---|---|---|---|
| l | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $i_{1,l}$ | 1 | 1 | 2 | 2 |
| $i_{2,l}$ | 1 | 2 | 2 | 1 |

TABLE I
SÉQUENCES POSSIBLES

sur cette fenêtre. La fenêtre d'observation est de dimension h et l'indice l représente la séquence de commutation en cours sur la fenêtre d'observation. Pour mieux expliquer ces notations, illustrons les par un exemple. Reconsidérons le modèle de l'équation (7). En fixant le nombre de modèles locaux à $q = 2$, on obtient un système avec deux modèles locaux avec $A_i \in \{A_1, A_2\}$. Pour $h = 2$, la fenêtre d'observation est $[k-2 : k]$ à l'instant k . La séquence de commutation est l'une des séquences du tableau I.

Ainsi, pour la seconde colonne de la table I, les matrices d'observabilité et de Toeplitz sont les suivantes :

$$O_2^{k,2} = \begin{pmatrix} C \\ CA_2 \\ CA_1A_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\left(T_2^{k,2}\right)_u = \begin{pmatrix} D_u & 0 & 0 \\ CB_u & D_u & 0 \\ CA_2B_u & CB_u & D_u \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\left(T_2^{k,2}\right)_d = \begin{pmatrix} D_d & 0 & 0 \\ CB_d & D_d & 0 \\ CA_2B_d & CB_d & D_d \end{pmatrix} \quad (12)$$

Dans le cas général, on peut observer q^h séquences différentes, aisément dénombrables. Formulons maintenant les deux hypothèses suivantes :

Hypothèse 1: Tous les modèles locaux sont observables ($\text{rang}(O_l^{k,h}) = \dim(x) = n, \forall h \geq n$) ou du moins leur partie non observable est stable asymptotiquement.

Hypothèse 2: Tous les modèles locaux sont discernables.

Ces hypothèses sont nécessaires pour pouvoir appliquer la méthode de l'espace de parité et permettent d'éviter des situations où il serait impossible de prendre une décision dans le cas où deux ou plusieurs résidus seraient simultanément nuls. Cette étude de discernabilité a été conduite, dans un contexte exclusivement structurel (sans tenir compte de la nature des signaux d'entrée sortie) par Cocquempot et al. [16]. Nous renvoyons le lecteur intéressé au résultat présenté dans cette communication. Ainsi, ces deux hypothèses garantissent l'isolabilité des différents modes de fonctionnement du système. Introduisons maintenant le lemme suivant :

Lemme 1: Étant donné une matrice $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ et un vecteur $b \in \mathbb{R}^m$, il existe un vecteur $x \in \mathbb{R}^n$ tel que $Ax = b$ si et seulement si l'égalité (13) est vérifiée :

$$(I - AA^+)b = 0 \quad (13)$$

où A^+ est la pseudo-inverse de $A : AA^+A = A$.

A l'aide des matrices d'observabilité et de Toeplitz définies respectivement par les équations (8) et (9) nous pouvons écrire l'équation (2) sous la forme suivante :

$$Y_k - \left(T_l^{k,h}\right)_u U_k = O_l^{k,h} x_{k-h+1} + \left(T_l^{k,h}\right)_d D_k \quad (14)$$

En se référant au lemme 1, l'état x_{k-h+1} peut être reconstruit si :

$$\left(I - \left(P_l^{k,h}\right) \left(P_l^{k,h}\right)^+\right) \left(Y_k - \left(T_l^{k,h}\right)_u U_k\right) = 0 \quad (15)$$

avec

$$P_l^{k,h} = \begin{pmatrix} O_l^{k,h} & \left(T_l^{k,h}\right)_d \end{pmatrix}$$

L'algorithme itératif de détermination du mode de fonctionnement actif est détaillé dans ce qui suit. Cet algorithme se résume en deux étapes principales : une première étape servant à la détermination des paramètres d'initialisation de l'algorithme et une seconde étape faite d'une procédure de calcul et d'analyse de résidus à chaque instant.

Algorithme :

Étape 1. Initialisation

Collecter les données d'entrée et de sortie

Choisir la taille h de la fenêtre d'observation

Pour $l = 1, \dots, q^h$:

Calculer les matrices d'observabilité $O_l^{k,h}$

Calculer les matrices de Toeplitz $\left(T_l^{k,h}\right)_{\{u,d\}}$

Calculer les matrices $\left(P_l^{k,h}\right) = \begin{pmatrix} O_l^{k,h} & \left(T_l^{k,h}\right)_d \end{pmatrix}$ et leur inverse $\left(P_l^{k,h}\right)^+$

Étape 2. Génération des résidus

A chaque instant k

Pour $l = 1, \dots, q^h$:

Calculer $r_l^{k,h} = \left(I - \left(P_l^{k,h}\right) \left(P_l^{k,h}\right)^+\right) \left(Y_k - \left(T_l^{k,h}\right)_u U_k\right)$

Analyser les résidus $r_l^{k,h}$

Si $r_j^{k,h} = 0$ alors le modèle \hat{j} est actif

L'horizon d'observation h doit être choisi de façon à engendrer une redondance temporelle pour chaque modèle local.

L'une des principales contraintes de la méthode proposée vient de l'explosion combinatoire du nombre de résidus à générer. En effet, le nombre de résidus à calculer augmente avec la taille de l'horizon d'observation du système et avec le nombre de modèles locaux. Toutefois, la connaissance d'informations a priori sur le processus peut permettre de limiter le nombre de résidus à générer. Il s'agit d'informations comme les séquences de commutations « interdites »

ou impossibles ou encore la durée minimale qui sépare deux commutations. Il est important de noter, cependant, qu'une grande partie du calcul peut être faite hors-ligne. En effet dans l'expression de $r_l^{k,h}$, les matrices $P_l^{k,h}$ sont calculées une fois pour toute et mémorisées.

IV. EXEMPLES

Nous présentons ici un exemple académique servant de support de validation pour la méthode proposée. Nous avons choisi un système du second ordre avec deux modèles locaux. Les valeurs des matrices caractérisant le système sont données par les équations (16) à (20).

$$A_1 = \begin{pmatrix} -0.0109 & 0.0109 \\ -0.0206 & 0.0106 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} -0.011 & -0.0205 \\ 0.01044 & -0.0215 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$B_u = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad B_d = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$C = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$D_u = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D_d = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \quad (20)$$

À l'instant initial, la matrice A_1 est la matrice active. Une commutation survient dans le système à l'instant $k = 100$ faisant prendre à la matrice d'état la valeur A_2 . Une autre commutation intervient à l'instant $k = 300$ activant de nouveau la matrice A_1 . Enfin à l'instant $k = 400$, une dernière commutation rend de nouveau la matrice A_2 active.

La figure 1 indique l'évolution des entrées, des perturbations, des sorties et des états du système. Nous avons représenté, sur la figure représentant les états du système (dernier tracé de la figure 1), les instants de changement de régime du système par des traits verticaux continus.

La figure 2 présente l'évolution des différents résidus calculés. Du début de la simulation jusqu'à l'instant $k = 99$ le résidu calculé pour la séquence ($A_1 \rightarrow A_1$) (deuxième tracé de la figure 2) est nul tandis que tous les autres résidus sont différents de zéro. Il est donc évident que sur l'intervalle $[0, 99]$, la matrice A_1 est la matrice active. De l'instant $k = 100$ jusqu'à l'instant $k = 300$, le résidu généré pour la séquence ($A_2 \rightarrow A_2$) (troisième tracé de la figure 2) prend une valeur nulle, montrant que la matrice A_2 est devenue active. La transition de la matrice A_1 vers A_2 est confirmée par le fait que le résidu généré pour la séquence ($A_1 \rightarrow A_2$) (dernier tracé de la figure 2) prend une valeur nulle à l'instant $k = 100$. Un commentaire analogue est valable sur les intervalles $[300, 400]$ et $[400, 500]$. Dans le contexte considéré, la détection est ainsi effectuée car en l'absence de bruit, le résidu peut être rigoureusement nul. En présence de bruit, une procédure de détection de rupture dans les résidus (le test de Page [6, 8] par exemple) permettrait aisément d'estimer les instants de commutation du système. Dans cet exemple, étant donné que le système dispose de deux capteurs, il est possible de générer les

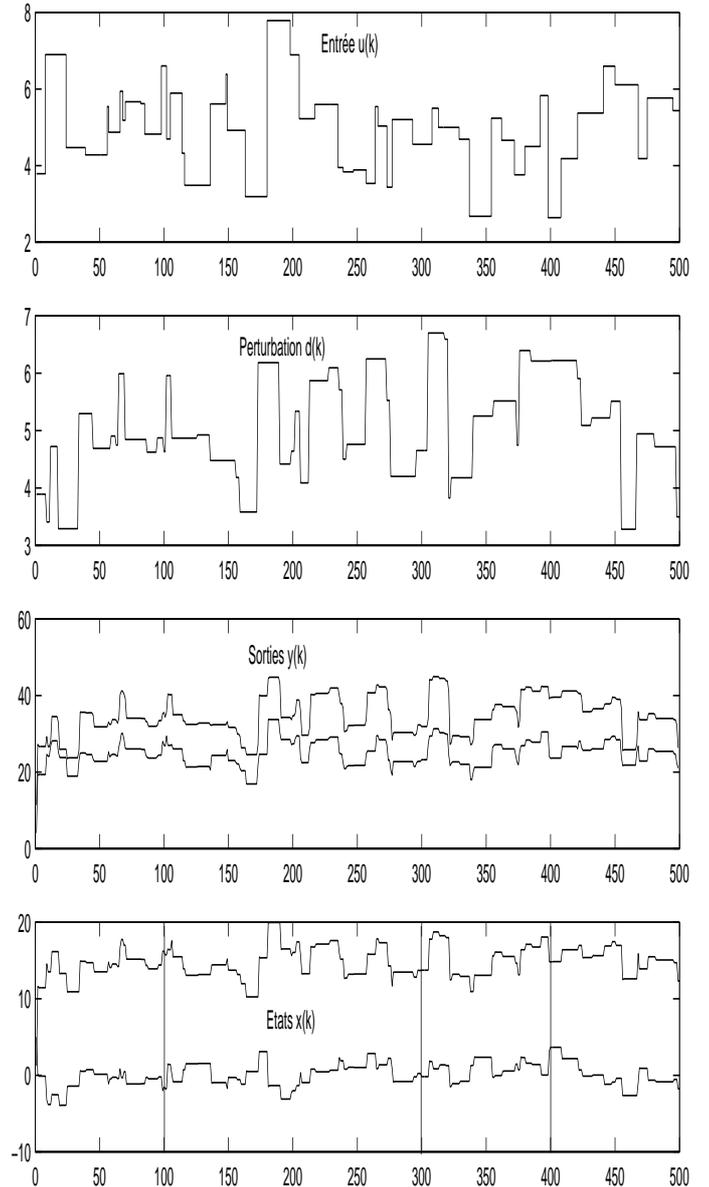


Fig. 1. Entrées, sorties, perturbation et états du système

résidus en ne prenant en compte que des mesures issues exclusivement d'un seul des deux capteurs à la fois. On peut ensuite procéder à la fusion des résultats issus des différents résidus calculés ou ne garder que les résidus obtenus pour le capteur le plus « juste » en termes de mesures ou le moins soumis à l'influence des bruits. Ceci peut être fort utile pour les systèmes où certains capteurs fournissent de meilleures mesures que d'autres.

Nous présentons ensuite à la figure 3 l'évolution des résidus pour le même système que précédemment. Toutefois, cette fois, nous avons supposé que tous les modes de fonctionnement du système n'étaient pas a priori connus. Ainsi, à l'instant $k = 450$ le système est entré dans un mode non connu de l'algorithme de détermination du modèle actif et des instants de commutation. Comme on peut l'observer sur la figure 3 cela se manifeste par le fait qu'aucun des quatre résidus ne prend une valeur nulle à partir de l'instant $k = 400$. La suite logique de cette première étape

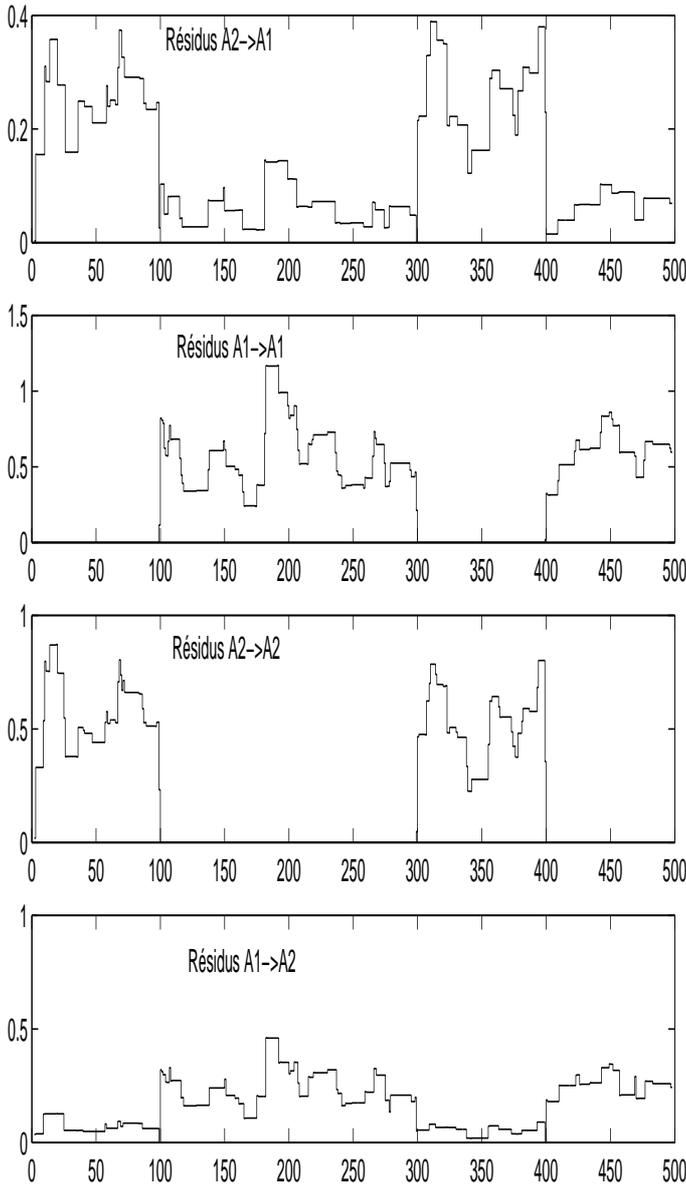


Fig. 2. Détection du modèle courant et des instants de commutation

d'observation est la mise en œuvre d'une procédure d'identification du nouveau modèle détecté. L'identification du nouveau modèle sera faite à partir des signaux d'entrée et de sortie du système collectés à partir de l'instant de détection de l'apparition du nouveau modèle. Nous ne détaillons pas, dans cet article, la procédure d'identification qui rentre dans le champ des développements futurs relatifs à l'amélioration de la technique globale de diagnostic des systèmes à commutation.

Enfin, la figure 4 montre l'évolution des résidus en situation bruitée. Nous avons en effet ajouté, sur la sortie du système, un bruit de mesure. Il est évident qu'en fixant un seuil pour les différents résidus, on peut arriver à déterminer le modèle actif à chaque instant. Mieux encore, il est possible d'appliquer aux résidus des tests statistiques de détection de changements abrupts dans un signal comme proposé dans [8].

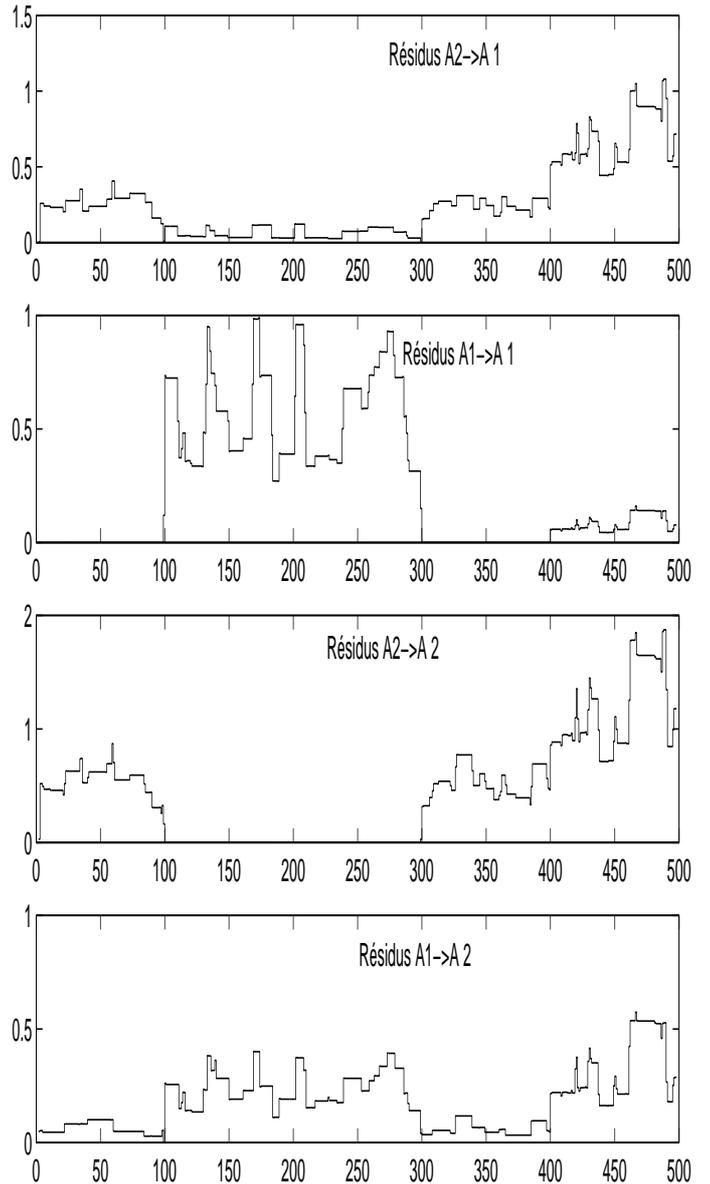


Fig. 3. Evolution des résidus

V. CONCLUSION

Nous avons proposé dans cet article une méthode pour la détermination des instants de commutation d'un système à commutation et du modèle local actif à chaque instant. La méthode repose sur l'analyse de résidus générés à partir des différents modèles du système.

En perspective, nous projetons de définir la sensibilité de la méthode proposée par rapport aux bruits de différentes natures. Un autre point qui sera étudié sera celui du fonctionnement du système en mode non supervisé. On supposera dans ce cas que l'on ne dispose pas d'une connaissance complète de tous les modèles locaux du système. Il s'agira alors de procéder, au cours du fonctionnement du système, à l'identification simultanée des modes de fonctionnement non répertoriés.

Ce travail a été réalisé dans le cadre des activités de l'action spécifique « Diagnostic des systèmes hybrides » (AS 193, RTP 20, STIC CNRS) et de l'équipe-projet multi-

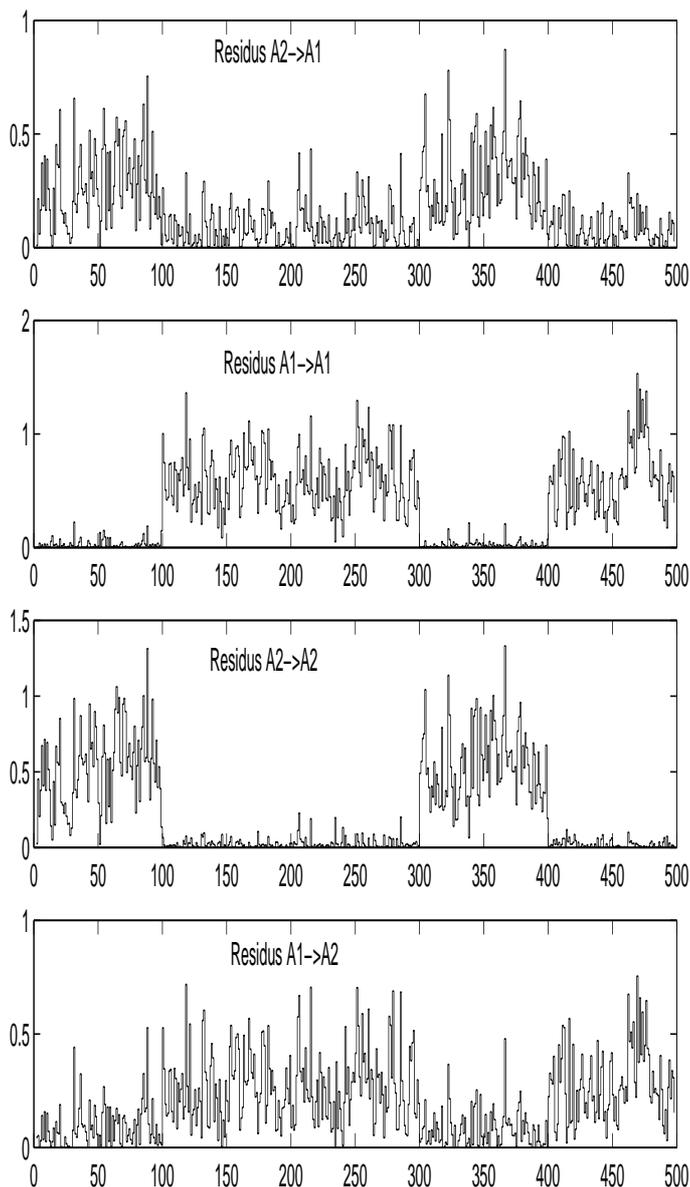


Fig. 4. Evolution du résidus en présence de bruits de mesure

laboratoires « Sécurité des procédés industriels agroalimentaires et biotechnologiques » (EPML 63, RTP 20, STIC CNRS).

RÉFÉRENCES

- [1] R. Murray-Smith et T. Johansen, *Multiple model approaches to modeling and control*. Taylor & Francis, London, United Kingdom, 1997.
- [2] M. Staroswiecki et G. Comte-Varga, « Analytic redundancy relations for faults detection and isolation in algebraic dynamic systems », *Automatica*, 37(5), pp. 687 – 699, 2001.
- [3] S. Narasimhan, G. Biswas, G. Karsai, T. Pasternak et F. Zhao, « Building observers to address fault isolation and control in hybrid systems », *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Nashville, USA, pp. 2393 – 2398, 2000.
- [4] A. Balluchi, L. Benvenuti, MD Benedetto et L. Sangiovanni-Vincentelli, « Design of observers for hybrid systems », *Hybrid Systems Computation and Control*, Stanford California, USA, pp. 76 – 89, 2002.
- [5] S.A. McIlraith, « Diagnosis hybrid systems, a bayesian model selection approach », *11th Workshop on Principle of Diagnosis*, Morélia, Mexique, pp. 140 – 146, 2000.

- [6] D. Maquin, J. Ragot. *Diagnostic des systèmes linéaires*. Collection pédagogique d'Automatique, Hermès Sciences Publications, 2000.
- [7] J.J. Gertler. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker Inc, 1998.
- [8] M. Basseville, et I. Nikiforov. *Fault Detection of Abrupt Changes, Theory and Application*. Prentice Hall, 1993.
- [9] T. Johansen, « Identification of non linear systems structures and parameters using regime decomposition », *Automatica*, vol. 31, pp. 321 – 326, 1995.
- [10] T. Kailath. *Linear systems*. Prentice Hall, 1980.
- [11] G.A. Ackerson et K.S. Fu. « On state estimation in switching environments », *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 15, pp. 10 – 17, 1970.
- [12] R. Vidal, A. Chiuso et S. Soatto. « Observability and identifiability of Jump Linear Systems », *IEEE International Conference on Decision and Control*, Las Vegas NV, USA, pp. 3614 – 3619, 2002.
- [13] A. Akhenak, M. Chadli, D. Maquin et J. Ragot, « State estimation via multiple observer with unknown inputs : application to the three tank system », *5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Washington DC, USA, pp. 1227 – 1232, 2003.
- [14] K. Gasso, G. Mourot et J. Ragot. « Structure identification in multiple model representation : elimination and merging of local models », *15th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, USA, pp. 2992 – 2997, 2001.
- [15] K. Gasso, G. Mourot et J. Ragot. « Structure identification of multiple models with output error local models », *15th IFAC World Congress on Automatic Control*, Barcelone, Espagne, 2002.
- [16] V. Cocquempot, M. Staroswiecki et T. El Meznyani, « Switching time estimation and fault detection for hybrid systems using structured parity residuals », *5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Washington DC, USA, pp. 681 – 686, 2003.
- [17] J. Ragot, D. Maquin et E.A. Domlan, « Switching time estimation of piecewise linear systems. Application to diagnosis », *5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Washington DC, USA, pp. 699 – 704, 2003.