

Détection et isolation de défauts d'un système à trois cuves par un banc d'observateurs adaptatifs

B. NAIT SLIMANI

Laboratoire de conception et conduit des systèmes de production
Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou
naitslimani_boukhalfa@yahoo.fr

S. DJENNOUNE

Laboratoire de conception et conduit des systèmes de production
Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou

Résumé — Dans cet article nous présentons une méthode de diagnostic de défauts à base d'observateurs pour un système dynamique non linéaire. Cette méthode consiste à concevoir un banc d'observateurs adaptatifs permettant de générer des résidus pour détecter et isoler les défauts actionneurs d'une manière robuste. Nous allons ensuite appliquer cette méthode pour le cas de défauts actionneurs d'un système à trois cuves et nous examinerons, en simulation, la robustesse de cette méthode vis-à-vis des bruits de mesure.

Mots clés : Systèmes non linéaires, observateurs adaptatifs, détection et isolation de défauts.

I. INTRODUCTION

L'utilisation des nouvelles technologies pour accroître la qualité des produits et des services ainsi que la productivité, a rendu les systèmes industriels de plus en plus complexes, et donc plus vulnérables aux défauts. Ces derniers peuvent engendrer une baisse de rendement du système ou des conséquences graves au niveau de la sécurité. Il est donc, nécessaire de développer des méthodes permettant de détecter et d'isoler ces défauts et éviter ainsi, toutes conséquences indésirables. Pour cela, plusieurs méthodes FDI (Fault Detection and Isolation) sans ou avec modèle ont été proposées. Les méthodes à base de modèles, notamment celles à base d'observateurs, sont assez bien développées, surtout pour les systèmes linéaires, où différents types d'observateurs ont été proposés en fonction de la nature du problème [1] (défaut en présence de bruit, de perturbations, d'incertitudes etc...). Pour le cas des systèmes non linéaires, les observateurs les plus utilisés pour la résolution du problème FDI sont principalement ; les observateurs adaptatifs [3], les observateurs à mode glissant [4] et les observateurs à grand gain [5]. Lorsque les paramètres d'un système sont inconnus ou changent au cours du temps, l'utilisation des observateurs simples pour l'estimation d'état devient difficile. Cela est dû au fait qu'on doit estimer simultanément l'état et les paramètres du système. Dans ce cas, les observateurs adaptatifs sont les mieux appropriés. La suite de ce papier est organisée comme suit. Dans la deuxième section, nous allons d'abord exposer une méthodologie de synthèse d'observateurs adaptatifs pour une classe de systèmes non linéaires, puis nous

définirons une structure de génération de résidus pour la détection et l'isolation de défauts actionneurs. Dans la troisième section, nous examinerons les performances de cette méthode sur le cas de défauts actionneurs d'un système à trois cuves. Enfin, nous terminerons cet article par une conclusion.

II. SYNTHÈSE D'OBSERVATEURS ADAPTATIFS

On considère la classe de systèmes non linéaires affines en la commande définie par l'équation d'état :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + G(x)u \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

Où $x(t) \in R^n$ est le vecteur d'état $f(x) \in R^n$ et $G(x) \in R^{n \times m}$ sont respectivement le champ de vecteur et la matrice de commande dont les éléments sont non linéaires, $u \in R^m$ est le vecteur correspondant aux sorties des actionneurs et $C^{p \times p}$ est la matrice de sortie dont les éléments sont constants. La matrice $G(x)$ peut être reformulée en fonction des vecteurs $g_j(x)$ c'est-à-dire $G(x) = [g_1(x) \ g_2(x) \ \dots \ g_n(x)]$. C'est une classe de systèmes assez générale pour laquelle l'existence d'observateurs pouvant résoudre le problème FDI nécessite que les colonnes de $G(x)$ soient de rang plein pour tous $x \in R^n$. Le système (1) peut être réécrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \sum_{j=1}^m g_j(x)u_j \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

L'objectif est de concevoir un banc d'observateurs adaptatifs capables de détecter et d'isoler les défauts actionneurs qui peuvent affecter le système. On suppose que tous les états sont disponibles à la mesure. Le problème FDI peut donc être résolu, en comparant les valeurs observées des états à celles mesurées. Lorsque les états du système ne correspondent pas à leurs estimées, il se peut que l'un des actionneurs soit en défaut. Cependant, il reste à savoir lequel de ces actionneurs est en défaut. On suppose que les défauts actionneurs sont additifs abrupts, c'est-à-dire si le $l^{\text{ème}}$ actionneur est en défaut alors la sortie de l'actionneur est $u_l^f = u_l + f_{al}$. Où t_f est l'instant de

l'occurrence du défaut, f_{al} est le défaut additif supposé constant et u_l est la sortie de l'actionneur en absence de défaut. Nous allons aussi, limiter notre étude sur le cas de défauts simples (un seul actionneur est en défaut à la fois). Fragkoulis [6] a fait une extension du modèle défectueux des systèmes linéaires proposé par Chen et Saifi [7] aux systèmes non linéaires et propose un modèle défectueux non linéaire pour le système (2) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \sum_{j=1}^m g_j(x)u_j + g_l(x)u_l^f \\ y = Cx \end{cases} \quad (3)$$

Où u_l^f est l'actionneur en défaut.

On suppose que les états sont tous disponibles à la mesure et on définit pour le système non linéaire (3) la structure d'observateurs donnée par la forme générale suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}^{(i)} = f(x) + \sum_{j \neq i} g_j(x)u_j + g_i(x)\hat{u}_i^f + H(\hat{x}^{(i)} - x) \\ \hat{u}_i^f = -2\chi(\hat{x}^{(i)} - x)^T P g_i(x), 1 \leq i \leq m \\ \hat{y}^{(i)} = Cx^{(i)} \end{cases} \quad (4)$$

Où $\hat{x}^{(i)}$ est le vecteur d'état estimé de x lorsque le $i^{ème}$ actionneur est supposé être en défauts, \hat{u}_i^f est l'estimé de $i^{ème}$ actionneur en défaut. La matrice H est une matrice d'Hurwitz qui peut être choisie de telle sorte que l'observateur ait une dynamique plus rapide que celle du système, c'est la matrice qui assure la stabilité de d'observateur ; χ est une constante de conception et P est une matrice définie positive solution de l'équation de Lyapunov :

$$H^T P + PH = -Q$$

Où Q est une matrice définie positive qu'on peut choisir arbitrairement.

Génération de résidus

Le diagnostic de défauts à base d'observateurs est basé sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (issues de l'observateur). Le vecteur résidu r est calculé alors en faisant la différence, éventuellement filtrée, entre les sorties réelles et celles estimées. Il est lié à cette différence par un opérateur mathématique O (dérivé, norme, moyenne etc.), c'est-à-dire :

$$r_i = O(\hat{y}_i - y_i)$$

L'observateur revient finalement à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie.

Si un seul observateur suffit pour détecter un défaut, plusieurs observateurs sont nécessaires pour le localiser. En effet, lorsqu'on souhaite déterminer la provenance d'un défaut on doit concevoir un banc de plusieurs observateurs qui permettra

de l'isoler en se basant sur des structures de génération de résidus bien définies. La structure la plus répandue dans la littérature et la structure d'observateurs généralisée (GOS). Elle consiste à concevoir un banc d'observateurs ou chacun d'entre eux permettra de générer un résidu qui soit sensible à tous les défauts sauf un. Le principe de cette structure est illustré par la Figure 1

Le nombre d'observateurs à concevoir est égal au nombre d'actionneurs du système. Ainsi, pour un système possédant deux actionneurs on conçoit un banc de deux observateurs. Le premier observateur correspondant au premier actionneur (Il permet de surveiller le premier actionneur) sera donné par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}^{(1)} = f(x) + H(\hat{x}^{(1)} - x) + g_1\hat{u}_1^f + g_2u_2 \\ \hat{u}_1^f = -2\chi(\hat{x}^{(1)} - x)^T P g_1 \end{cases}$$

Le deuxième observateur qui correspond au deuxième actionneur sera donné par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}^{(2)} = f(x) + H(\hat{x}^{(2)} - x) + g_1u_1 + g_2\hat{u}_2^f \\ \hat{u}_2^f = -2\chi(\hat{x}^{(2)} - x)^T P g_2 \end{cases}$$

On doit donc, concevoir autant d'observateurs que d'actionneurs à surveiller. Le vecteur $\hat{x}^{(i)}$ donne une estimation de x en supposant que c'est le $i^{ème}$ actionneur qui est en défaut. A tout instant, chacun de ces vecteurs $\hat{x}^{(i)}$ donne une estimation du vecteur x comme si le défaut agit sur l'actionneur qu'il surveille, et au final seul l'observateur correspondant à l'actionneur qui est vraiment en défaut va donner une estimation exacte du vecteur x . Les estimées seront ensuite toutes comparées à la valeur de x pour générer les résidus. En effet, dans [7], il a été démontré que si le $i^{ème}$ actionneur est en défaut alors :

$$\text{Pour } i = l : \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{x}^{(l)} - x) = 0$$

$$\text{Pour } i \neq l : \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{x}^{(i)} - x) \neq 0$$

$$\text{Avec } (\dot{\hat{x}}^{(i)} - \dot{x}) = H(x^{(i)} - x) + b_l(u_l - u_l^f) - b_i(u_i - u_i^f)$$

Le problème de détection et d'isolation de défauts peut être résolu par l'évaluation des résidus si les colonnes $g_1(x), \dots, g_m(x)$ sont linéairement indépendantes pour tous $x \in R^n$, c'est-à-dire si $g(x)$ est une matrice de rang plein. Cette condition est juste suffisante pour la résolution du problème FDI par cette méthode. Si elle n'est pas vérifiée cela ne veut pas dire qu'on ne peut pas détecter et isoler le défaut. Il peut éventuellement se faire par d'autres méthodes.

Pour détecter et isoler les défauts provenant des actionneurs nous allons utiliser la structure GOS que nous avons défini précédemment. On conçoit donc m observateurs adaptatifs. Chaque observateur va permettre de générer un résidu qui soit insensible à un seul défaut et sensible à tous les autres défauts (Figure 1). Nous avons dit que les résidus sont liés par un

opérateur mathématique aux différences entre les grandeurs mesurées et les grandeurs estimées par l'observateur. Pour ce type d'observateur, Chen et Saif [6] recommandent d'utiliser la norme de la différence entre la sortie estimée et la sortie mesurée. Ce choix permet de faire une bonne isolation et détection de défauts.

Dans notre cas les états sont tous mesurables. Les résidus peuvent alors être définis en fonction des états par :

$$r_i(t) = \left\| \hat{x}^{(i)}(t) - x(t) \right\|^2, 1 \leq i \leq m$$

Lorsqu'un défaut survient, le résidu correspondant à l'actionneur en défaut reste à une valeur nulle ou très faible, alors que les autres résidus prennent des valeurs plus grandes.

Ainsi si le $i^{ème}$ actionneur est en défaut alors :

$$\text{Pour } i = l : \quad \lim_{t \rightarrow \infty} r_l(t) = 0$$

$$\text{Pour tous } i \neq l : \quad \lim_{t \rightarrow \infty} r_i(t) \neq 0$$

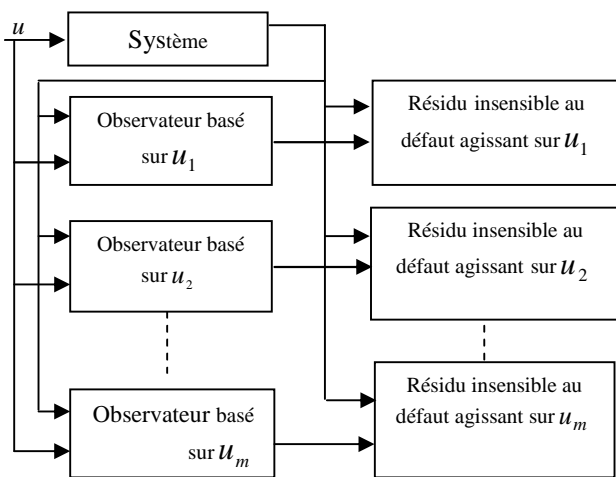


Fig. 1 Structure GOS pour la détection et l'isolation de défauts actionneurs.

Remarque 1

Il est important de signaler que le défaut ne peut être détecté et isolé que lorsque on atteint le régime permanent, car si le résidu est différent de zéro pendant le régime transitoire cela peut correspondre simplement au fait que, les valeurs estimées n'ont pas encore convergé vers leurs valeurs réelles correspondantes.

III. DETECTION ET ISOLATION DE DEFAUT D'UN SYSTEME A TROIS CUVES :

Le système considéré (Figure 2) est composé de trois cuves cylindriques de sections identiques S . Les cuves sont reliées par deux tuyaux cylindriques de section S_p dont les

coefficients de viscosité sont $\sim_1 = \sim_3$. La sortie du système est située au niveau de la cuve 2, elle aussi, est caractérisée par une section S_p dont le coefficient de viscosité est \sim_2 . Deux pompes commandées par des moteurs à courant continu alimentent les cuves 1 et 2 avec des débits $q_1(t)$ et $q_2(t)$. Les trois réservoirs sont équipés de trois capteurs de pression pour mesurer le niveau de liquide ($x_1(t)$, $x_2(t)$ et $x_3(t)$). Ces niveaux sont stabilisés, respectivement, aux valeurs $0.3m$, $0.2m$ et $0.27m$ (figure 3).

L'écriture des équations de conservation de volume de liquide nous donne :

$$\begin{cases} S \frac{dx_1(t)}{dt} = q_1(t) - q_{13}(t) \\ S \frac{dx_2(t)}{dt} = q_2(t) + q_{32}(t) - q_{20}(t) \\ S \frac{dx_3(t)}{dt} = q_{13}(t) - q_{32}(t) \end{cases}$$

Où $q_{ij}(t)$ représente le débit de liquide de cuve i vers la cuve j qu'on peut exprimer en utilisant la loi de Torricelli par :

$$q_{ij}(t) = \sim . S_p . \text{sign}(x_i(t) - x_j(t)) . \sqrt{2g|x_i(t) - x_j(t)|}$$

et $q_{20}(t)$ représente le débit de sortie donnée par :

$$q_{20}(t) = \sim_2 . S_p . \sqrt{2gh(t)}$$

On suppose, et cela sans restreindre notre étude, que le niveau des trois cuves vérifie les inégalités suivantes : $x_1(t) > x_3(t) > x_2(t)$. En d'autres termes on donne un sens particulier au débit inter cuves $q_{ij}(t)$. Avec cette supposition on peut définir un modèle non linéaire affine en la commande qui décrit parfaitement le système en présence de défauts actionneurs comme suite :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -2C_1 \sqrt{x_1(t) - x_3(t)} + \frac{u_1(t) + f_{a1}}{S} \\ \dot{x}_2(t) = 2C_3 \sqrt{x_3(t) - x_2(t)} - 2C_2 \sqrt{x_2(t)} + \frac{u_2(t) + f_{a2}}{S} \\ \dot{x}_3(t) = 2C_1 \sqrt{x_1(t) - x_3(t)} - 2C_3 \sqrt{x_3(t) - x_2(t)} \\ y_1(t) = x_1(t) \\ y_2(t) = x_2(t) \\ y_3(t) = x_3(t) \end{cases}$$

Étant donné que nous avons deux actionneurs, nous devons concevoir un banc de deux observateurs pour les surveiller. Les trois niveaux sont mesurables, alors, nous allons utiliser la forme de résidus définie par :

$$r = \|\hat{y} - y\|^2$$

C'est une forme qui permet d'avoir des résidus plus sensibles aux défauts. La Figure 4 présente les deux résidus r_1 et r_2 associés, respectivement, aux deux actionneurs u_1 et u_2 en absence de défauts. Nous remarquons que les valeurs des résidus ne sont pas égales à zéro pendant la phase transitoire, elles mettent un certain temps pour atteindre leurs valeurs constantes nulles. Afin de tester l'efficacité de la technique de détection et d'isolation des défauts à l'aide d'observateurs adaptatifs nous avons injecté des défauts additifs abrupts simples (un seul actionneur est en défaut à la fois) sur les deux actionneurs, respectivement, lorsque le système a atteint son régime permanent. Dans un premier test nous avons injecté un défaut sur le premier actionneur en augmentant sa valeur (augmenter le débit) de 20% à $t = 500s$, et dans le deuxième test nous avons injecté un défaut sur le deuxième actionneur en augmentant toujours sa valeur de 20% au même instant. Les résultats sont représentés respectivement par la figure 5 et la figure 6. On constate sur ces figures que, lorsqu'un défaut survient sur un actionneur, seul le résidu correspondant à cet actionneur demeure à sa valeur nulle, ce qui veut dire que c'est cet actionneur qu'est affecté par le défaut. L'actionneur en défaut est donc localisé.

Défaut en présence de bruit sur la mesure

Pour évaluer la sensibilité des résidus aux défauts en présence de bruits, nous avons introduit des bruits sur chaque un des signaux de mesure, puis nous avons introduit des défauts simples. Les défauts injectés ont les mêmes caractéristiques et valeurs que dans le cas sans bruits. La Figure 7 représente les résidus associés aux deux observateurs en présence de défaut sur le premier actionneur. La figure 8 représente les résidus en présence de défaut sur le deuxième actionneur. Comme le montre les deux figures, malgré que les résidus soient influencés par le bruit, ils permettent toujours de détecter et d'isoler le défaut et identifier ainsi l'actionneur en défaut.

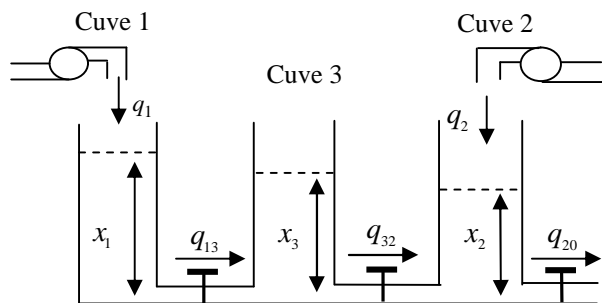


Fig. 2: Schématisation du système à trois cuves.

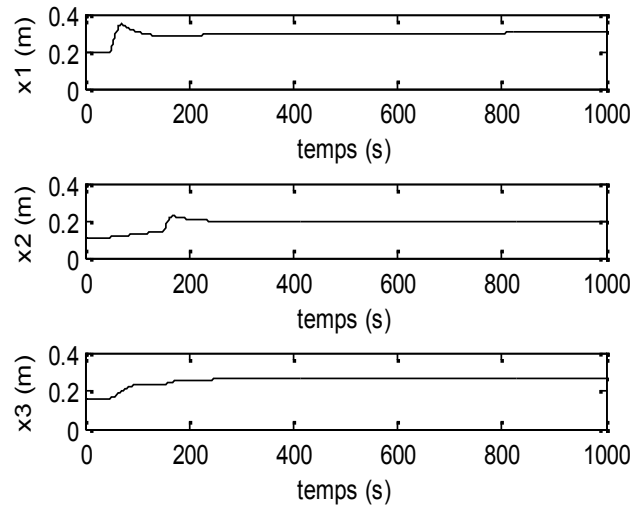


Fig. 3 Niveaux des trois cuves.

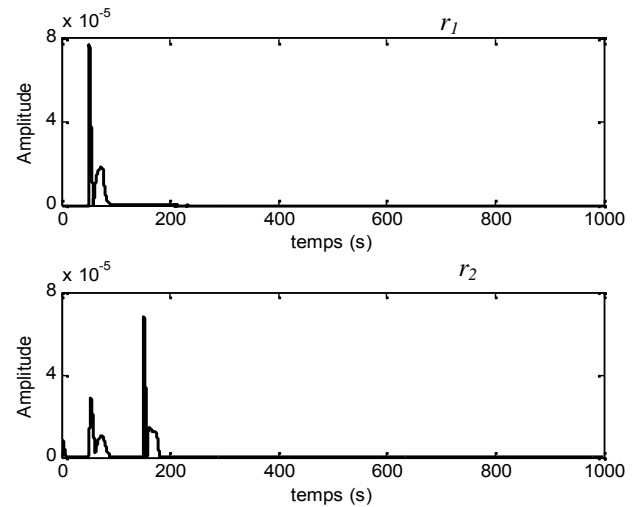


Fig. 4 Résidus en absence de défauts.

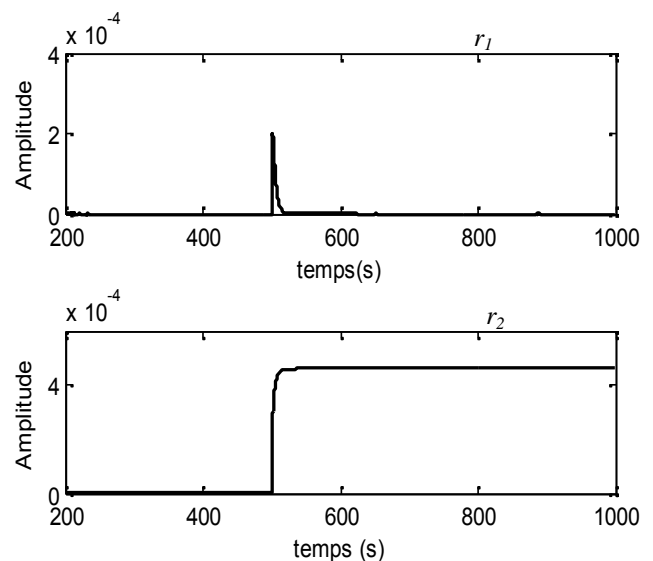


Fig. 5 Résidus en présence de défaut sur le premier actionneur.

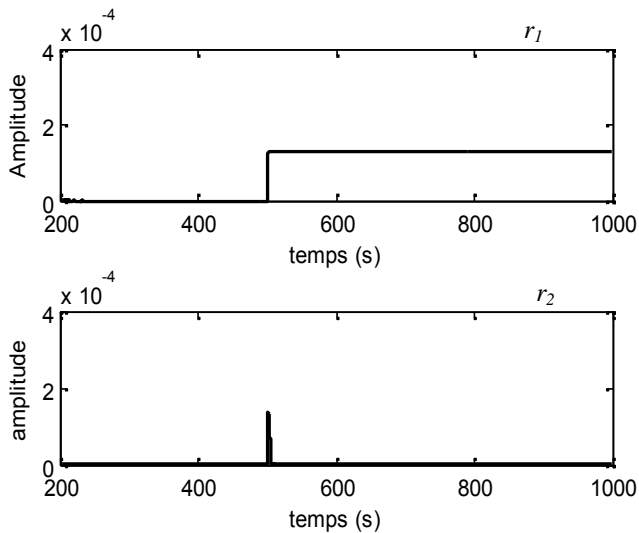


Fig.6: Résidus en présence de défaut sur le deuxième actionneur.

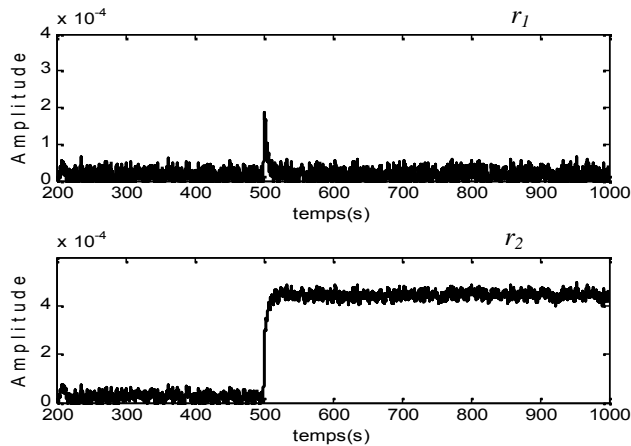


Fig.7: Résidus en présence de défaut sur le premier actionneur et d'un bruit sur la mesure.

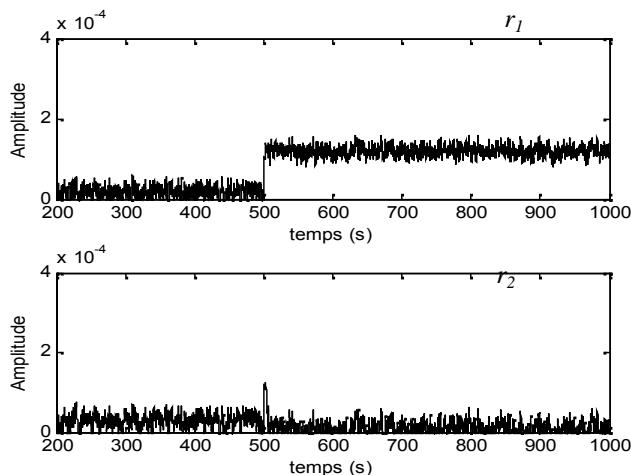


Fig.8: Résidus en présence de défaut sur le deuxième actionneur et d'un bruit sur la mesure.

VI. CONCLUSION

Dans cet article nous avons présenté une méthode de diagnostic de défauts basée sur les observateurs adaptatifs non linéaires. Nous avons ensuite appliqué cette méthode pour la détection et l'isolation de défauts actionneurs d'un système à trois cuves. Les résultats de simulation montrent que cette méthode est efficace pour la détection et l'isolation de défauts, même en présence de bruit de mesure.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] W. Chen, J. Guangqing et M. Saif. Application of Sliding Mode Observers for Actuator Fault Detection and Isolation in Linear Systems. IEEE Conference on Control Applications Toronto, Canada, August 28-31, 2005.
- [2] C. Edwards et S. Spurgeon et R. Patton . Sliding mode observers for fault detection and isolation, Automatica, vol. 3, pp. 541-553, 2000.
- [3] H. Wang and S. Daley, "Actuator fault diagnosis: an adaptive observer-based technique, IEEE TRANSACTION. on Automatic Control, vol.41, No.7, pp. 1073-1078, 1996.
- [4] W. Junzheng, J. Zhao et L. Ma. A Robust Fault Detection and Isolation Method via Sliding Mode Observer, Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, China, 2004.
- [5] H. Hammouri, M. Kinnaert et E. H. El Yaagoubi. Observer-Based Approach to Fault Detection and Isolation for Nonlinear Systems. IEEE Transaction on Automatic Control, Vol.44, pp.1879-1884, 1999.
- [6] D. Fragkoulis, G. Roux and B. Dahhou. A new scheme for detection, isolation and identification of single and multiple actuator faults, International Conference on Prognostic and Health Management, Denver, USA? 2007
- [7] Chen, W. and M. Saif. An Actuator Fault Isolation Strategy for Linear and Nonlinear Systems, Proceedings of the American Control Conference, Portland, USA, 2005.