

Diagnostic des défauts à base d'observateur dans un système éolien

Ahlem Boumaiza^a, Fayçal Arbaoui^a, Med Larbi Saïdi^a

^aLaboratoire d'Automatique et Signaux, Université Badji Mokhtar Annaba, BP. 12, 23000, Annaba, ALGÉRIE

Abstract

The wind energy participates strongly in the electric power production in the industrial world. As all industrial systems, the wind turbine can be threatened by anomalies that are likely to cause damages of its performances or even to provoke a total stop of the installation. Therefore the fault diagnosis methods are necessary. In this article, in order to anticipate the apparition of a dysfunction, either to avoid them, or to limit the consequences, we used a model-based fault diagnosis technique to detect and isolate sensor and actuator faults in the pitch systems of the wind turbine blades. It is about an observer applied on a "Benchmark" model for fault detection and isolation faults (FDI) in a wind turbine, the results of simulation by MATLAB / SIMULINK are presented to validate the efficiency of this diagnosis method.

Keywords: Wind turbine; diagnosis; fault; observer based method.

Nomenclature

u_θ velocity in the direction of (m/s)

A radius of (m)

B position of

C further nomenclature continues down the page inside the text box

Greek symbols

γ stoichiometric coefficient

δ boundary layer thicknesses(m)

Subscripts

r radial coordinate

1. Introduction

Dans un monde variable et qui se développe jours après jours, le besoin en de nouvelles sources d'énergies est nécessaire pour la production d'électricité. A cause du tarissement de l'énergie fossile dans le monde, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à d'autres sources d'énergie dites renouvelables au détriment des sources d'énergie traditionnelle.

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie exploitée par l'homme comme dans les moulins à vent pour le pompage de l'eau. Cette énergie offre deux grands avantages en étant totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet. Mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance.

Le système éolien est de plus en plus complexe et l'opération de diagnostic qui consiste à détecter et localiser les défauts qui affectent le système est devenu indispensable pour assurer la sûreté de fonctionnement et la disponibilité de ces systèmes.

En générale, l'éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité [1] (Fig.1). Les pales de la turbine éolienne captent une partie de l'énergie contenue dans l'air et transmet une énergie mécanique au multiplicateur. Ce dernier transforme la vitesse lente d'arbre de turbine en une vitesse beaucoup plus élevée compatible avec la plage de vitesse de fonctionnement du générateur électrique permettant de générer du courant électrique qui sera délivrée au réseau.

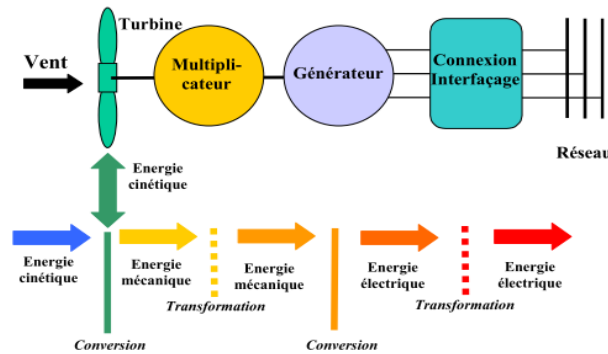


Figure 1. Conversion de l'énergie cinétique du vent [1].

2. Description du système éolien

Le but de cette section est de présenter un modèle mathématique de la turbine éolienne. Le modèle devrait être bien détaillé pour l'utiliser comme un modèle de simulation. Ce modèle est dérivé et développé par Odgaard et al. [2] pour pouvoir lui appliquer les méthodes de diagnostic.

Le modèle considéré reflète une éolienne à axe horizontal à trois pales, de vitesse variable, avec un convertisseur complet et de puissance de 4.8 MW. Ce modèle "Benchmark" contient quatre sous-modèle : les pales et le système de calage (Blade & Pitch System), le train d'entraînement (Drive Train), le convertisseur et le générateur (Converter and Generator) et enfin le contrôleur (Controller). Ces sous modèles sont montrés dans la Fig. 2, où les variables intervenant dans ces sous-systèmes sont définies dans [2], [3], [4].

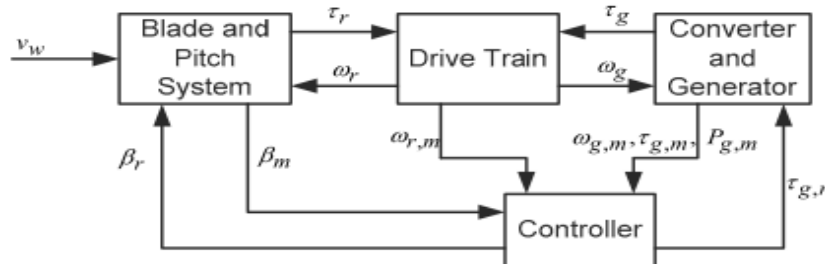


Figure 2. Schéma des sous-modèles de système éolien [5].

2.1. Modèle du vent

Dans ce modèle une séquence de la vitesse du vent prédéfini est utilisée (Fig.3), [3], [4]. D'après cette figure, on peut remarquer que la vitesse du vent varie dans la gamme de 5 m/s à 20 m/s, avec quelques pics à 25 m/s ce qui représente une bonne couverture de fonctionnement normale d'une éolienne.

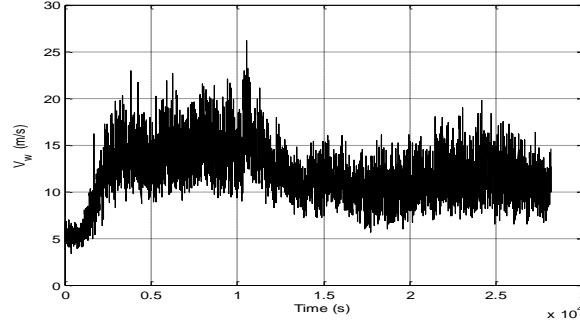


Figure 3. Représentation de la séquence de la vitesse de vent utilisée.

2.2. Modèle aérodynamique

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor.

- La puissance totale disponible dans le vent susceptible d'être recueillie par les pales peut s'écrire sous la forme :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_w^3 \quad (1)$$

Où ρ : densité de l'air [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], R : rayon des pales [m] et V_w : la vitesse du vent [m/s].

- La puissance captée par l'aérogénérateur s'exprime par l'équation suivante [1]:

$$P_a = P_w \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_w^3 \quad (3)$$

Où $C_p(\lambda, \beta)$: le coefficient de puissance, β : l'angle de calage, λ : Rapport de vitesse de la turbine et ω_r étant la vitesse angulaire du rotor, avec :

$$\lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{V_w} \quad (4)$$

- Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple référence aérodynamique est donc exprimé par l'Eq. (5) et (6), où A est la surface balayée par la turbine [2].

$$\tau_{g,r} = K_{opt} \cdot \omega_r^2 \quad (5)$$

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda^3} \quad (6)$$

- On introduisant le terme C_q , appelé le coefficient de couple :

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (7)$$

Puis on obtient alors la relation de couple aérodynamique suivante :

$$\tau_g = \frac{1}{2} \cdot C_q(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_w^2 \quad (8)$$

2.3. Modélisation du système à angle de calage

Le système se compose de trois actionneurs identiques, chacun ayant un contrôleur interne [2]. Dorénavant, on ne décrit qu'un seul actionneur. Cet actionneur ajuste l'angle de calage des pales en les faisant tourner. Cet actionneur hydraulique est modélisé comme une fonction de transfert de deuxième ordre :

$$\frac{\beta(s)}{\beta_r(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (9)$$

2.4. Le train d'entraînement

Le couple aérodynamique est transféré au générateur par le train d'entraînement pour augmenter la vitesse de rotation du rotor, à une plus haute vitesse exigée par le générateur. Ce modèle est construit d'un arbre lent et d'un arbre rapide liés par le multiplicateur (la boîte de vitesse) [6].

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r(t) \\ \dot{\omega}_g(t) \\ \dot{\theta}_\Delta(t) \end{bmatrix} = A_{dt} \begin{bmatrix} \omega_r(t) \\ \omega_g(t) \\ \theta_\Delta(t) \end{bmatrix} + B_{dt} \begin{bmatrix} \tau_r(t) \\ \tau_g(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{B_{dt} - B_r}{J_r} & \frac{B_{dt}}{N_g J_g} & 0 \\ \frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g J_g} & -\frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g^2 J_g} - B_g & \frac{\eta_{dt} K_{dt}}{N_g J_g} \\ 1 & \frac{-1}{N_g} & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B_{dt} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Où : J_r est le moment d'inertie de l'arbre lent [Kg.m²], B_{dt} : est le coefficient de torsion d'amortissement [Nm/(rad/s)], K_{dt} : la raideur de torsion [Nm/rad], $\theta_\Delta(t)$: l'angle de torsion [rad], B_g : la friction visqueuse de l'arbre rapide [Nm/(rad/s)], J_g : est le moment d'inertie de l'arbre rapide [Kg.m²], N_g : est le rapport de vitesse de multiplicateur et η_{dt} : le rendement.

2.5. Modèle du générateur et convertisseur

Dans cette section le modèle du convertisseur et générateur sont présentés. Le générateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, pendant qu'il est chargé par un moment de torsion délivré par le convertisseur. Il est décrit comme un système de premier ordre [2]:

$$\frac{\tau_g(s)}{\tau_{g,r}(s)} = \frac{\alpha_{gc}}{s + \alpha_{gc}} \quad (13)$$

- La puissance produite par le générateur dépend de la vitesse de rotation de générateur et de la charge appliquée, comme décrit dans l'équation suivante :

$$P_g(t) = \eta_g \omega_g(t) \tau_g(t) \quad (14)$$

$P_g(t)$: la puissance produite par le générateur [W] et η_g : est le rendement de générateur [%]

2.6. Modèle du contrôleur

L'éolienne fonctionne en quatre zones (Fig. 4), [1] :

Zone I : La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est insuffisante.

Zone II : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle (CP).

Zone III : La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée tout en restant la plus proche possible de la puissance nominale. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge (PC).

Zone IV : La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

Le contrôleur est actif dans les zones II et III. Dans la zone II la vitesse optimale du rotor est obtenue en utilisant le couple convertisseur comme signal de commande. La zone III correspond à une production de puissance constante. Dans ce travail, seules les zones II et III sont considérées [3].

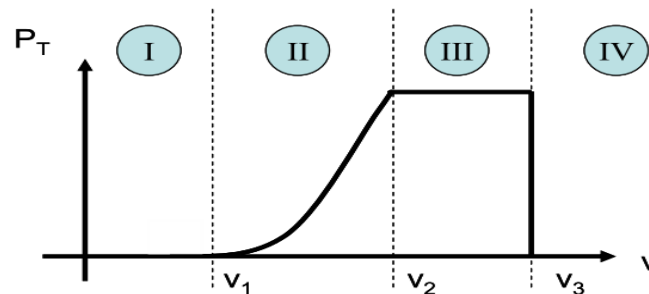


Figure 4. Zones de fonctionnement d'une éolienne [1].

Dans la section suivante une analyse des défauts est présentée pour choisir les défauts qui devront être manipulés dans ce travail, [4].

3. Scenarios des défauts

Dans le but d'identifier les défauts possibles dans une éolienne et de déterminer leur effet sur le comportement du système, des défauts pouvant surgir dans une éolienne sont choisis de manière à en couvrir les différents types. De plus la redondance dans le système est identifiée pour déterminer la détection des défauts [6].

1. Défaut de type valeur fixe dans le 2^{ème} capteur de position de pale 1, $\beta_{1,m2} = 23^\circ$ se produit entre 3500s et 4100s.
2. Défaut de type biais additif dans le 1^{ier} capteur de position de pale 2, $\beta_{2,m1} = 8$ se produit aux instants 3000s et 3400s.

3. Défaut de type gain dans le 1^{ier} capteur de position de pale 3, $\beta_{3,m1} = 0.5 \beta_{3,m1}$ se produit aux instants 1200s et 1600s.
4. Défaut de type valeur fixe dans le 1^{ier} capteur de vitesse de rotor, $\omega_{r,m1} = 2$ se produit aux instants 1000s et 2000s.
5. Défaut de type gain dans le 2^{ème} capteur de vitesse de générateur, $\omega_{g,m2} = 5 \omega_{g,m2}$ se produit aux instants 1000s et 2000s.
6. Défaut de changement lent du dynamique d'actionneur de calage, les paramètres d'actionneur de calage 2 (ω_n, ξ) changent de [11.11, 0.6] à [5, 0.8] aux instants 2400s et 3400s.
7. Défaut de changement brusque du dynamique d'actionneur de calage, les paramètres d'actionneur de calage 3 (ω_n, ξ) changent de [11.11, 0.6] à [9, 0.32] aux instants 3000s et 3200s.
8. Défaut de type offset dans l'actionneur du convertisseur, $\tau_g = 5000 + \tau_g$ aux instants 3100s et 4100s.
9. Défaut de Changement de la dynamique du multiplicateur, $\eta_{dt} = 0.92$ entre 3000s et 4200s.

4. Détection de défaut à base d'observateur

4.1. Méthode de détection des défauts de capteur et d'actionneur dans le système de calage à base d'observateurs

L'objectif de la FDI du système d'angle de calage est de détecter et d'isoler un défaut dans l'une des deux mesures de capteur d'angle de calage (c.-à-d. défaut dans $\beta_{i,m1}$ ou $\beta_{i,m2}$). La détection de défaut peut être accomplie par une vérification simple entre les deux mesures de capteur $|\beta_{i,m1} - \beta_{i,m2}|$ [7]. Après la détection de défaut, et afin de déterminer quel capteur est défectueux, une étape d'isolation de défaut (par observateur) est nécessaire. Chaque observateur est basé sur un des deux scénarios suivants:

Scénario1: capteur 2 est défectueux et capteur 1 est sain;

Scénario2: capteur 1 est défectueux et capteur 2 est sain;

Premièrement la représentation de système d'angle de calage en mode de fonctionnement normale est :

$$\begin{aligned} \dot{x}_{pb} &= A_{pb}x_{pb} + B_{pb}(\beta_r + \beta_f) \\ y_{pb} &= C_{pb}x_{pb} \end{aligned} \quad (15)$$

D'après [7] le vecteur d'état $x_{pb} = [\dot{\beta}_i \ \beta_i]^T$ contient la vitesse angulaire de calage $\dot{\beta}_i$ et la position β_i ($i=1, 2, 3$), $y_{pb} \in \mathfrak{R}$ est la mesure d'angle de calage, $\beta_r \in \mathfrak{R}$ la référence de position, $\beta_f \in \mathfrak{R}$ est l'erreur de position causé par le défaut défini comme [7]:

$$\beta_f = \beta_i - \frac{1}{2}(\beta_{i,m1} + \beta_{i,m2}) \quad (16)$$

Donc

$$\dot{x}_{pb} = A_{pb}x_{pb} + B_{pb}\beta_r + B_{pb}\left[\beta_i - \frac{1}{2}(\beta_{i,m1} + \beta_{i,m2})\right] \quad (17)$$

A partir de scénario 1 on a : $\beta_{i,m1} = \beta_i = C_{pb}x_{pb}$

Le système dynamique d'Eq. (15) sous le scenario 1 devient

$$\begin{aligned} \dot{x}_{pb} &= (A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb})x_{pb} + B_{pb}(\beta_r - 0.5\beta_{i,m2}) \\ \beta_{i,m1} &= C_{pb}x_{pb} \end{aligned} \quad (18)$$

Par analogie sous le scenario 2 le système devient : $\beta_{i,m1} = \beta_i = C_{pb}x_{pb}$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{pb} &= (A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb})x_{pb} + B_{pb}(\beta_r - 0.5\beta_{i,m1}) \\ \beta_{i,m2} &= C_{pb}x_{pb} \end{aligned} \quad (19)$$

D'après les systèmes d'équations (18) et (19) les deux observateurs, OBS1 et OBS2, sont décrits respectivement par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \hat{x}_{pb}^1 &= (A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb} - L_{pb}C_{pb})\hat{x}_{pb}^1 + B_{pb}(\beta_r - 0.5\beta_{i,m2}) + L_{pb}(\beta_{i,m1}) \\ \hat{\beta}_{i,m1} &= C_{pb}\hat{x}_{pb}^1 \end{aligned} \quad (20)$$

et

$$\begin{aligned} \hat{x}_{pb}^2 &= (A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb} - L_{pb}C_{pb})\hat{x}_{pb}^2 + B_{pb}(\beta_r - 0.5\beta_{i,m1}) + L_{pb}(\beta_{i,m2}) \\ \hat{\beta}_{i,m2} &= C_{pb}\hat{x}_{pb}^2 \end{aligned} \quad (21)$$

Où $\hat{\beta}_{i,m1}$ et $\hat{\beta}_{i,m2}$ sont les sorties estimées de $\beta_{i,m1}$ et $\beta_{i,m2}$ prévenant des deux observateurs et L_{pb} : est la matrice gain de l'observateur choisie pour assurer la stabilité de la matrice $A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb} - L_{pb}C_{pb}$.

On note l'erreur d'estimation par : $\tilde{\beta}_{i,m1} = \beta_{i,m1} - \hat{\beta}_{i,m1}$ et $\tilde{\beta}_{i,m2} = \beta_{i,m2} - \hat{\beta}_{i,m2}$

L'utilisation de bancs d'observateurs construits à partir d'une partie seulement des entrées et/ou des sorties du système permet de diagnostiquer les défauts. Les résidus générés sont comparés à des signatures de défauts.

On a considéré une structure de bancs d'observateurs : La structure GOS (*Generalized Observer Scheme*): où le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par toutes les sorties (entrées) sauf la $i^{\text{ème}}$ et toutes les entrées (sorties).

- Si $|\tilde{\beta}_{i,m1}|$ égale à zéro et $|\tilde{\beta}_{i,m2}|$ différente de zéro, on conclut que le capteur 1 est défectueux ;
- Si $|\tilde{\beta}_{i,m2}|$ égale à zéro et $|\tilde{\beta}_{i,m1}|$ différente de zéro, on conclut donc que le capteur 2 est défectueux ;
- Si $|\tilde{\beta}_{i,m1}|$ et $|\tilde{\beta}_{i,m2}|$ sont les deux différente de zéro, alors on conclut qu'il existe un défaut d'actionneur.

5. Simulation des résultats

Dans cette section on va appliquer la méthode précédente, c.à.d. détection des défauts à base d'observateurs, sur deux systèmes de calage β_1, β_3 .

5.1. Système 1 (défaut valeur fixe dans $\beta_{1,m2}$)

Pour le système de calage β_1 on a introduit un défaut de capteur de type valeur fixe (défaut 1) dans la deuxième mesure de capteur $\beta_{1,m2}$ pour l'intervalle de 3500-4100 s.

La Fig. 5 représente les deux mesures $\beta_{1,m1}$ (sans défaut) et $\beta_{1,m2}$ (avec défaut) obtenus par capteur 1 et capteur 2,

Dans le cas général, en absence de défaut les deux sorties des capteurs ($\beta_{1,m1}$ et $\beta_{1,m2}$) sont presque identiques, mais après l'apparition de défaut on peut remarquer qu'il y a au moins une des composantes de ces résidus qui réagisse à la présence de cette anomalie. Le défaut est détectable dans l'intervalle de temps mentionné précédemment est le temps de détection est d'environ 0,02s.

La Fig. 6 représente les deux résidus délivrés par OBS1 et OBS2 en présence de défaut;

Comme nous pouvons le voir, dû à la présence du bruit de capteur, le résidu n'est pas correctement égal à zéro en absence de défaut. Le résidu change considérablement après l'apparition de défaut.

Le résidu délivré par OBS2 (en bas) converge vers zéro, par contre le résidu délivré par OBS1 (en haut) diverge de zéro entre 3500-4100s (sensibilité au défaut), et d'après la structure de localisation de défaut indiqué dans la section précédente on peut conclure qu'il existe un défaut de capteur dans la deuxième mesure $\beta_{1,m2}$ avec un temps d'isolation 0.5 s.

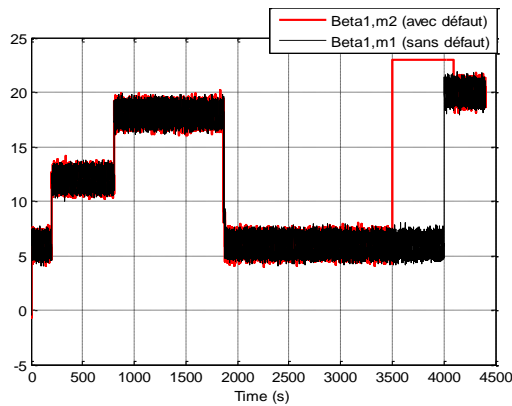


Figure 5. Evaluation des mesures $\beta_{1,m1}$ (en noir sans défaut) et $\beta_{1,m2}$ (en rouge avec défaut) concernant la pale 1

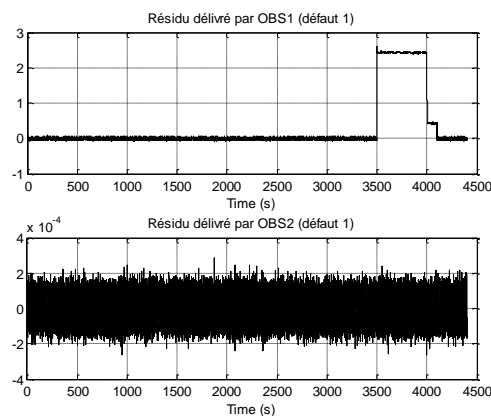


Figure 6. Reconstruction de défaut de capteur dans le système de calage 1 (défaut 1)

5.2. Système 3 (défaut 3 et 7 dans $\beta_{3,m1}$)

Pour ce système on a associé au défaut de capteur un défaut d'actionneur :

- Défaut de capteur de type gain (défaut 3) dans la première mesure de capteur ($\beta_{3,m1}$) et dans l'intervalle de 1200-1600 s ;
- Défaut d'actionneur causé par une pression faible dans l'huile (défaut 7) qui se développe progressivement dans l'intervalle entre 3000-3200 s ;

La Fig.7 représente les deux mesures $\beta_{3,m1}$ et $\beta_{3,m2}$ obtenues par le capteur 1 et le capteur 2, respectivement, avec l'évaluation des défauts, Elle montre clairement les changements d'un régime normal à un régime défaillant, ce qui permet donc la détection de défaut 3 et 7, avec un temps de détection d'environ de 0.02s et 0.6s, respectivement.

La Fig.8 représente les deux résidus délivrés par OBS1 et OBS2. Les deux défauts sont détectables dans les intervalles de temps mentionnés précédemment,

On divise le temps de simulation en deux parties :

- De 0 à 2000 s : le résidu délivré par OBS2 (en bas) s'éloigne de manière significative de zéro entre 1200-1600s, donc il est sensible au défaut, par contre le résidu délivré par OBS1 (en haut) reste toujours de valeur moyenne sensiblement nulle, et d'après la structure de localisation de défaut indiqué dans la section 4.1 on constate qu'il existe un défaut de capteur dans la première mesure ($\beta_{3,m1}$) avec un temps d'isolation de 0.6 s.
- De 2000 à 4500 s les résidus délivrés par OBS1 et OBS 2 sont différents de zéro entre 3000-3200 s, donc d'après la structure de localisation de défaut indiqué dans la section 4.1, on distingue qu'il existe un défaut d'actionneur avec un temps d'isolation égale a 1.6s ;

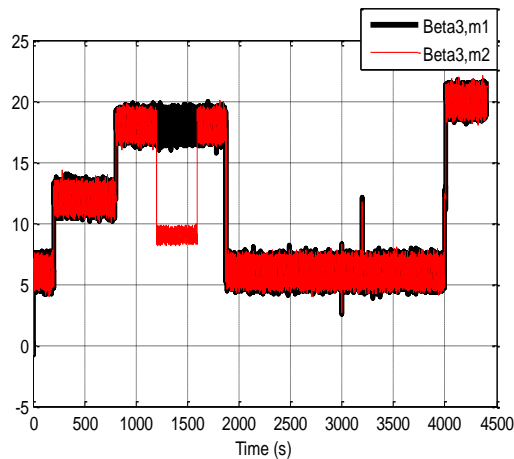


Figure 7. Evaluation des mesures $\beta_{3,m1}$ (en rouge) et $\beta_{3,m2}$ (en noirs) avec défaut de capteur et d'actionneur concernant la pale 3

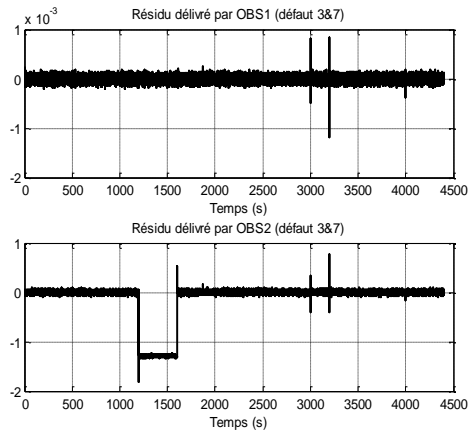


Figure 8. Reconstruction de défaut de capteur et d'actionneur dans le système de calage 3 (défaut 3, 7)

6. Conclusion

Aujourd'hui l'éolienne apporte des développements majeurs pour augmenter la puissance produite en ajustant l'angle de calage des pales afin de capter beaucoup de vent. Donc les pales de la turbine éolienne jouent un rôle très important dans la chaîne de conversion d'énergie.

Dans ce travail, une méthode à base d'observateurs pour la détection et la localisation des défauts de capteur et d'actionneur dans le système de calage des pales éolienne est présentée.

Les résultats obtenus par simulation montrent que les méthodes de diagnostic à base d'observateurs du système de calage sont très encourageantes, principalement en présence de bruits.

Cet observateur permet de bonnes performances pour la détection de défauts grâce à une bonne robustesse vis-à-vis des incertitudes, des bruits et des perturbations en plus d'une détection rapide des défauts et la génération de plusieurs résidus.

7. Références

- [1] Laverdure, N., 2005. Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires, thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble.
- [2] Odgaard, P.F., Stoustrup, J., Kinnaert, M., 2009. "Fault Tolerant Control of Wind Turbines - a benchmark model," In Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, Jun, pp. 155-160.
- [3] Odgaard, P.F., Stoustrup, J., 2012. "Fault Tolerant Control of Wind Turbines using Unknown Input Observers," In Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, August 29-31. National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico.
- [4] Odgaard, P.F., Stoustrup, J., 2012. "Fault Tolerant Wind Speed Estimator used in Wind Turbine Controllers," The 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, August 29-31. National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico.
- [5] Odgaard, P.F., Stoustrup, J., 2012. "Results of a Wind Turbine FDI Competition," In Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of

Technical Processes, August 29-31. National Autonomous University of Mexico, Mexico City, Mexico.

- [6] Esbensen, T., Sloth, C., 2009. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of Wind Turbines, Master's Thesis, Aalborg University, Denmark.
- [7] Zhang, X., Zhang, Q., Zhao, S., Ferrari, R., Polycarpou, M. M., Parisini, T., 2011. "Fault Detection and Isolation of the Wind Turbine Benchmark: an Estimation-based Approach," In Proceedings of the 18th International Federation of Automatic Control World Congress (IFAC), August 28 - September 2. Milan, Italy.

