

Analyse par intervalles pour la détection de défauts de capteurs. Application à l'énergie éolienne.

Clément LETELLIER, Houcine CHAFOUK, Ghaleb HOBLOS

IRSEEM (Institut de Recherche en Systèmes Electroniques EMbarqués)

Technopôle du Madrillet, Avenue Galilée, BP 10024,

76801 Saint Etienne du Rouvray, France

clement.letellier@esigelec.fr

Résumé— Afin de garantir un fonctionnement optimal des systèmes, il est primordial de s'assurer du bon fonctionnement de ceux-ci. Pour cela diverses méthodes telles que l'espace de parité ont vu le jour. Le principe consiste à tester la nullité d'équations de redondance entre différentes grandeurs connues caractérisant le système. Dans cet article, l'attention est portée sur les systèmes dont les paramètres sont incertains. En effet, dans certains cas les paramètres du système évoluent alors que la structure du modèle est inchangée. Il y a donc incohérence entre le modèle et le système physique. Cela entraîne, dans les procédures de diagnostic, des erreurs de détection de défauts. Dans notre cas, les paramètres sont compris entre intervalles ce qui permet de prendre en compte leurs évolutions. L'espace de parité dans le cas des systèmes incertains permet de générer une enveloppe servant de seuil de détection et permet de contourner les écueils des méthodes statistiques. Ainsi, il est possible de déterminer si une irrégularité du vecteur de parité est due à une incertitude ou à un défaut.

Mots-clés— Diagnostic, système incertain, espace de parité, approche bornante, analyse ensembliste, analyse par intervalle

I. INTRODUCTION

D'abord appliqué aux applications industrielles comportant de hauts risques comme le nucléaire et l'aéronautique [13], ainsi qu'aux secteurs d'activité de pointe tels que l'industrie de l'armement ou l'aérospatial [8], le diagnostic s'étend à d'autres domaines industriels. En effet, la sécurité du personnel, la fiabilité ainsi que la disponibilité sont devenus des enjeux importants, c'est pourquoi les systèmes de surveillance sont de plus en plus plébiscités par le monde industriel.

Un dysfonctionnement sur une installation peut avoir de lourdes conséquences pour un industriel. Une machine qui ne fonctionne pas provoque un ralentissement de l'activité de l'entreprise.

En outre, les installations étant de plus en plus complexes et de grande taille, les risques encourus étant de plus en plus importants, l'analyse des défaillances se complique dû à la quantité d'informations à analyser ; la surveillance devient inimaginable à l'échelle humaine. Il devient donc nécessaire d'adjoindre à l'opérateur un système d'aide à la décision voire de rendre la surveillance automatique.

D'une manière générale, la surveillance d'un système repose sur les informations recueillies par les capteurs. La perte d'informations ou bien une information erronée en provenance d'un capteur peut avoir des conséquences catastrophiques sur une installation ; des détériorations ou des pertes de performances du système peuvent en résulter. Une

procédure de diagnostic doit donc être en mesure de traiter un défaut affectant directement le système ou bien l'un de ses organes (actionneurs, capteurs).

Le concept de redondance analytique est souvent utilisé pour la détection des défauts. Il repose sur les tests de consistance qui confrontent les mesures du système physique avec l'information contenue au sein du modèle. De cette manière des résidus peuvent être obtenus. Une inconsistance apparaît si un résidu est différent de zéro ou qu'un paramètre estimé dévie anormalement. La détection et l'isolation de défaut à base de modèle analytique (Fault Detection & Isolation, FDI) a fait l'objet de nombreuses publications durant plus de trente ans. Plusieurs méthodes de diagnostic ont émergé : les observateurs d'état, l'espace de parité [6] et l'estimation paramétrique. L'espace de parité a été introduit par Chow et Willsky [7]. Des approches basées sur l'observateur d'état ont été développées par Patton et Frank [12]. Quant à l'identification paramétrique, elle a été traitée par Isermann [10].

Le problème majeur de la détection de défaut est que le modèle ne représente seulement qu'une approximation de la réalité. En effet, les erreurs de modélisations dues à la linéarisation ou aux variations des paramètres physiques ne sont pas prises en considération. Une erreur de modélisation ne doit pas être vue comme un défaut par la procédure de détection. Les techniques classiques tentent d'annuler les incertitudes sans vraiment les prendre en compte durant la détection. Le filtre de Kalman constitue une exception parmi les algorithmes de détection de défaut car les incertitudes sur le modèle sont considérées. Cependant, le filtre de Kalman a ses propres limites car il ne peut traiter que les incertitudes additives. Très peu de recherches ont été effectuées sur les moyens de prendre en compte les incertitudes multiplicatives. Horak et Allison [9] ont proposé une méthode permettant d'estimer les enveloppes des systèmes incertains.

L'approche ensembliste est apparue, il y a une vingtaine d'années, pour résoudre des problèmes d'identification. Au lieu de représenter les incertitudes par l'intermédiaire de variables stochastiques gaussiennes, les incertitudes sont représentées par un ensemble de valeurs dont seules les bornes sont connues. Cette méthode de représentation est appelée, l'approche bornante ou l'approche ensembliste. Cette approche a été utilisée pour le diagnostic de défaut par Armengol et al. [2]. L'espace de parité utilisant l'approche bornante a été développé par Adrot [1]. Une méthode à base d'observateur par intervalle permettant l'isolation des défauts a été présentée par Puig et al. [14].

Toutes ces méthodes peuvent être mises au profit des nouvelles ressources d'énergie telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique. En effet, le nombre de systèmes à superviser augmente sans cesse. Les procédures de diagnostic basées sur l'approche ensembliste sont fiables et permettent de résoudre les problèmes liés aux incertitudes ; elles représentent une perspective majeure en termes de supervision de ces nouveaux systèmes de plus en plus complexes.

Dans la suite de cet article, une méthode de diagnostic basée sur l'espace de parité va être exposée. Le modèle retenu pour les simulations est celui d'une génératrice d'éolienne pour lequel il a été démontré que l'influence des paramètres jouait un rôle important sur la qualité de détection [4] ; l'étude portera donc sur les systèmes incertains. La prise en compte des incertitudes se fera à l'aide de l'analyse par intervalle.

II. MODELE DE LA GENERATRICE D'EOLIENNE

Le modèle utilisé pour réaliser les simulations est celui d'une **G**énératrice **A**synchrone **D**oublement **A**limentée (GADA) d'éolienne. On présentera le modèle d'une manière parfaitement définie, par conséquent les matrices A et B seront supposées entièrement déterminées. Dans la réalité, les paramètres du modèle sont bien souvent variables ce qui entraîne des erreurs de modélisation. En effet, les perturbations extérieures telles que les variations de la température, l'humidité, les vibrations peuvent impacter les paramètres du modèle. Cela aura pour conséquence d'influer sur la qualité de la détection [4], (cf. Section III).

Le modèle de la génératrice est décrit dans la base (α, β) par les équations suivantes [3], [5] :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (1)$$

Avec :

$$Y = X = \begin{pmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \\ u_{\alpha r} \\ u_{\beta r} \end{pmatrix}$$

$$A = \frac{1}{S} \begin{pmatrix} -R_s L_r & \omega_m L_h^2 & L_h R_r & \omega_m L_r L_h \\ -\omega_m L_h^2 & -R_s L_r & -\omega_m L_r L_h & L_h R_r \\ L_h R_s & -\omega_m L_s L_h & -R_s L_r & -\omega_m L_s L_r \\ \omega_m L_s L_h & L_h R_s & \omega_m L_s L_r & -R_s L_r \end{pmatrix}$$

$$B = \frac{1}{S} \begin{pmatrix} L_r & 0 & -L_h & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_h \\ -L_h & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_h & 0 & L_s \end{pmatrix}$$

Où :

- $S = (L_s L_r - L_h^2)$
- $i_{\alpha s, \beta s}, i_{\alpha r, \beta r}$ sont respectivement les courants stator et rotor sur les phases alpha et bêta.

- $u_{\alpha s, \beta s}, u_{\alpha r, \beta r}$ sont respectivement les tensions stator et rotor sur les phases alpha et bêta.
- ω_m est la vitesse de rotation de la génératrice.
- L_s, L_r, L_h sont respectivement les inductances stator, rotor et mutuelle.
- R_s, R_r sont respectivement les résistances du stator et du rotor.

III. INFLUENCE DES PARAMETRES INCERTAINS DE LA GADA

Des tests ont été effectués dans Bennouna et al. [4] sur un simulateur numérique. L'ensemble complet de l'éolienne est décrit ci-dessous :

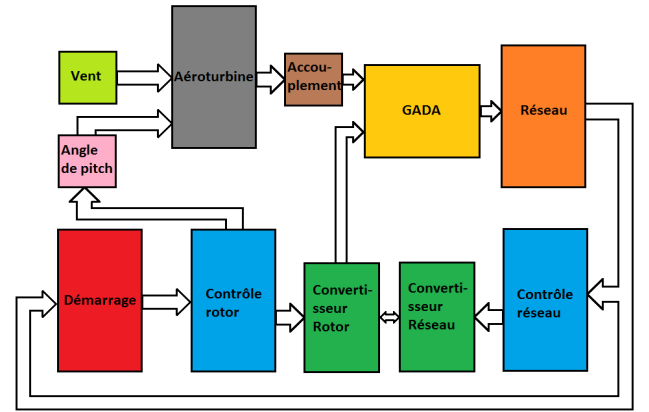


Fig. 1. : Schéma fonctionnel d'une éolienne

Plusieurs tests ont été menés en modifiant un ou plusieurs paramètres. Les résultats obtenus par Bennouna et al. [4] présentent les changements concernant les paramètres R_r et L_s .

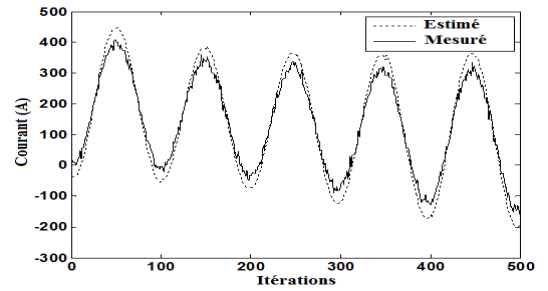


Fig. 2. : Courant stator sur l'axe Alpha

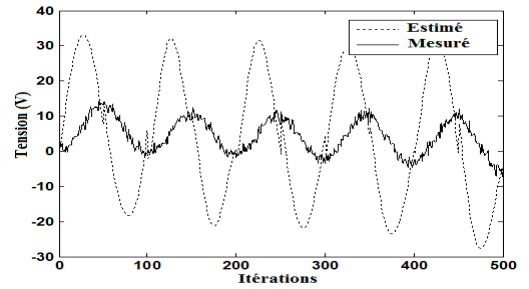


Fig. 3. : Tension rotor sur l'axe Alpha

Les figures 2 et 3 ci-dessus montrent que la modification des paramètres R_r et L_s a une forte influence sur les résultats de l'estimation et influence donc fortement le diagnostic.

L'utilisation de l'analyse par intervalles permet de gérer les incertitudes sur les paramètres afin d'obtenir un modèle parfaitement défini par des intervalles.

IV. APPROCHE DE L'ESPACE DE PARITE

A. Définitions et notations de l'analyse par intervalle

L'idée maîtresse de l'analyse par intervalle est de remplacer les nombres réels par des intervalles auxquels ils appartiennent. Il est ainsi possible d'obtenir des résultats numériques garantis en transposant aux intervalles les algorithmes de calculs classiques [11].

Définition d'un intervalle

Un intervalle (fermé) est un sous-ensemble connexe de \mathbb{R} . Par conséquent, l'ensemble des intervalles de \mathbb{R} est noté \mathbb{R} . Par exemple : $[1, 3]$ et $[-\infty, -2]$ sont des intervalles.

Caractérisation d'un intervalle

Un intervalle peut être défini de deux manières : directement par les bornes [*Borne Inférieure, Borne Supérieure*] ou par le couple (*Centre, Rayon*).

$$\text{Intervalle : } [x] = x \in \mathbb{R} \mid x^- \leq x \leq x^+$$

$$\text{Largeur : } w([x]) = x^+ - x^-$$

$$\text{Centre : } m([x]) = \frac{x^+ + x^-}{2}$$

$$\text{Rayon : } r([x]) = \frac{x^+ - x^-}{2}$$

Opérations de base sur les intervalles

Les opérations classiques utilisées avec des réels sont redéfinies de la manière suivante avec les intervalles :

$$\text{Addition : } [x] + [y] = [x^- + y^-, x^+ + y^+]$$

$$\text{Soustraction : } [x] - [y] = [x^- - y^+, x^+ - y^-]$$

$$\text{Multiplication : } [x] \cdot [y] = [\min(a), \max(a)]$$

et $a = (x^- y^-, x^- y^+, x^+ y^-, x^+ y^+)$

$$\text{Division : } [x] / [y] = [x] \cdot \left[\frac{1}{y^+}, \frac{1}{y^-} \right], \text{ si } 0 \notin [y]$$

B. Approche de l'espace de parité

Considérons un modèle dynamique linéaire et incertain défini par les relations discrètes suivantes :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A \cdot x_k + B \cdot u_k \\ y_k = C \cdot x_k \end{cases} \quad (2)$$

avec

$$x_k \in [x_k], x_{k+1} \in [x_{k+1}], y_k \in [y_k], A \in [A], B \in [B], C \in [C]$$

Où les matrices A, B et C représentent respectivement les matrices d'état, de commande et d'observation. Ces matrices sont représentées entre crochets [] car les paramètres de celles-ci sont définis par intervalles. A noter que le vecteur d'état x_{k+1} est lui aussi entre crochets car il est calculé en fonction de [A] et [B] qui sont des matrices ayant des paramètres θ compris dans des intervalles.

En regroupant les vecteurs de mesures sur un horizon $[k, k+s]$, la forme statique suivante est déduite [1] :

$$[Y_{k,s}] = [C_s][x_k] + [H_s]U_{k,s-1} \quad (3)$$

Où :

$$[C_s] = \begin{pmatrix} [C] \\ [C][A] \\ [C][A]^2 \\ \vdots \\ [C][A]^s \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$[H_s] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ [C][B] & 0 & \dots & 0 \\ [C][A][B] & [C][B] & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [C][A]^{s-1}[B] & [C][A]^{s-2}[B] & \dots & [C][B] \end{pmatrix} \quad (5)$$

avec

$$C_s \in \mathbb{R}^{S_m \times n}, H_s \in \mathbb{R}^{S_m \times s \cdot q}, Y \in \mathbb{R}^{S_m} \text{ et } S_m = (s+1)m$$

Pour une taille suffisante de la fenêtre temporelle s, il est possible de se munir d'une matrice de projection appelée matrice de parité W, de rang plein, vérifiant la condition suivante :

$$[W][C_s] = 0 \quad (6)$$

La matrice [W] est obtenue en calculant en premier lieu la pseudo-inverse de C_s telle que :

$$[C_s^+] = \text{inv}([C_s]^T [C_s])[C_s]^T \quad (7)$$

Puis en appliquant la formule suivante [1] :

$$[W] = (I - [C_s][C_s^+]) \quad (8)$$

A noter que la formule (7) ne fonctionne que si le rang de $[C_s]$ est égal au nombre de colonnes.

Les vecteurs de parité suivants peuvent ainsi être obtenus par :

$$\begin{aligned} P_{\text{cal}(k+s)} &= W(Y_{k,s} - H_{s,0}U_{k,s-1}) = 0 \\ [P_{\text{éval}(k+s)}] &= \underbrace{[W][C_s]}_{=0}[x_k] + [W][H_{s,\theta}]U_{k,s-1} \end{aligned} \quad (9)$$

La procédure de diagnostic consiste à vérifier les relations définies en (9). Le vecteur de parité calculé $P_{cal(k+s)}$ est d'abord obtenu avec les paramètres certains du système modélisé. Ensuite, le vecteur de parité évalué $[P_{eval(k+s)}]$ est obtenu à l'aide des paramètres incertains du système modélisé. Pour un horizon $S=1$, les vecteurs de parité seront composé de 8 résidus. Il convient alors pour chacun d'eux de vérifier la relation suivante :

$$P_{cal(k+s)} \in [P_{eval(k+s)}] \quad (10)$$

On remarque que la méthode utilisée dans le cas des systèmes incertains est différente de celle employée dans le cas des systèmes certains. En effet, dans la méthode classique, la détection de défauts se base sur des tests statistiques. Le seuil est donc simplement défini par des lois mathématiques. Dans le cadre incertain, la génération du seuil de détection se fait d'une manière beaucoup plus naturelle et efficace. Effectivement, les bornes des incertitudes sur les paramètres apportent une information substantielle qui permet de générer une enveloppe faisant office de seuil de détection de défauts. Ainsi, il est possible de calculer le vecteur de parité $[P_{eval(k+s)}]$ qui est constitué de résidus ayant la forme d'une enveloppe remplaçant les seuils statistiques. De plus, l'enveloppe étant directement corrélée aux incertitudes des paramètres, il est possible d'obtenir une détection de défaut moins dépendante des erreurs de modélisation. En revanche, pour des défauts de faible ampleur et/ou dans le cas où les incertitudes sur les paramètres sont fortes, les défauts peuvent être vus comme des incertitudes de modélisation plutôt qu'un réel défaut capteur. Il convient bien sûr de rester cohérent entre les incertitudes qu'on impose au système et les défauts à détecter.

La figure 4 montre la procédure de détection de défauts basée sur la génération d'une enveloppe :

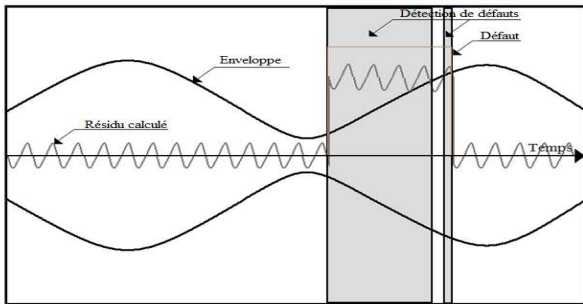


Fig. 4. : Procédure de détection de défaut

Dans cet exemple, un défaut de type biais est présent sur un capteur. Le défaut est détecté car le vecteur de parité calculé sort de l'enveloppe. Puis, le défaut est ensuite considéré comme une incertitude car le vecteur de parité rentre dans l'enveloppe. Ensuite, le vecteur de parité est de nouveau supérieur à l'enveloppe ; le défaut est alors de nouveau détecté. Le défaut peut être parfaitement détecté sur toute sa plage en ajoutant une logique de décision à la procédure de détection.

Pour réaliser la phase de tests, le type de défauts ainsi que les incertitudes sur les paramètres ont été modifiés afin d'évaluer la qualité de la détection. Les défauts concernés dans cette étude sont les défauts capteur. Dans cette série de tests un défaut a été ajouté sur la sortie $I_{\alpha s}$. Le paramètre incertain est la résistance rotor R_r .

A. Défaut de type biais

Un des défauts classiques que l'on peut trouver sur les capteurs est le défaut de type biais. Ce dernier a été ajouté à la sortie $I_{\alpha s}$ de l'itération 7000 à 8000. Le biais a une valeur de 30 A ce qui représente approximativement 5% de l'amplitude du signal. Une incertitude de $\pm 5\%$ sur la résistance rotor R_r a été choisie. Les matrices C_s et H_s ont été calculées sur un horizon $S=1$; le vecteur de parité est alors constitué de 8 résidus. La figure 5 représente en exemple le troisième des huit résidus. En rouge est représentée l'enveloppe qui correspond au vecteur de parité évalué. En vert est affiché le vecteur de parité calculé. En bleu, est représentée la fonction de détection.

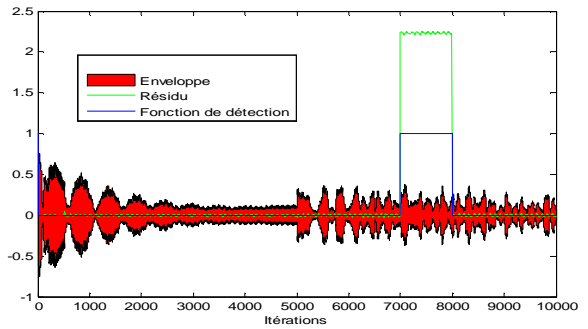


Fig. 5. : Défaut biais de 30 A sur $I_{\alpha s}$ et incertitude de 5% sur R_r

Sur la figure 5, on peut voir que le vecteur de parité calculé sort complètement de l'enveloppe générée de l'itération 7000 à 8000. En effet, la valeur du vecteur de parité calculé est approximativement de 2,25 alors que la borne supérieure de l'enveloppe est comprise entre 0,1 et 0,3. Le défaut est alors parfaitement détecté sur ce résidu.

Puisque le vecteur de parité est constitué de 8 résidus, il convient de les étudier un à un afin d'établir un diagnostic. La figure 6 représente les résidus obtenus. En rouge sont représentées les enveloppes et en bleu les vecteurs de parité calculés. Pour des raisons de lisibilité les graphes ont été affichés de l'itération 6000 à 9000.

La figure 6 montre que pour chacun des résidus, le vecteur de parité calculé sort de l'enveloppe. Le défaut peut aisément être détecté.

Mais, comme toute procédure de diagnostic, il se pose le dilemme de l'amplitude du défaut vis-à-vis des seuils de détection. Dans notre cas, le seuil est fonction de l'incertitude prise sur le paramètre R_r , autrement dit, il est représenté par l'enveloppe.

B. Défaut de type multiplicatif

Le défaut multiplicatif est un autre type d'erreur que l'on peut rencontrer sur les capteurs. Celui-ci a été simulé sur la sortie $I_{\alpha s}$ de l'itération 7000 à 8000.

L'enveloppe de la figure 7 est construite en fonction des incertitudes. Dans cet exemple, l'incertitude est de 3% sur le paramètre R_r .

Les matrices C_s et H_s ont été calculées sur un horizon $S=1$. Le vecteur de parité est donc constitué de 8 résidus. La figure 7 représente en exemple le troisième des huit résidus. En rouge est représentée l'enveloppe qui correspond au vecteur de parité évalué. En vert est affiché le vecteur de parité calculé. En bleu, la fonction de détection indique la présence d'un défaut.

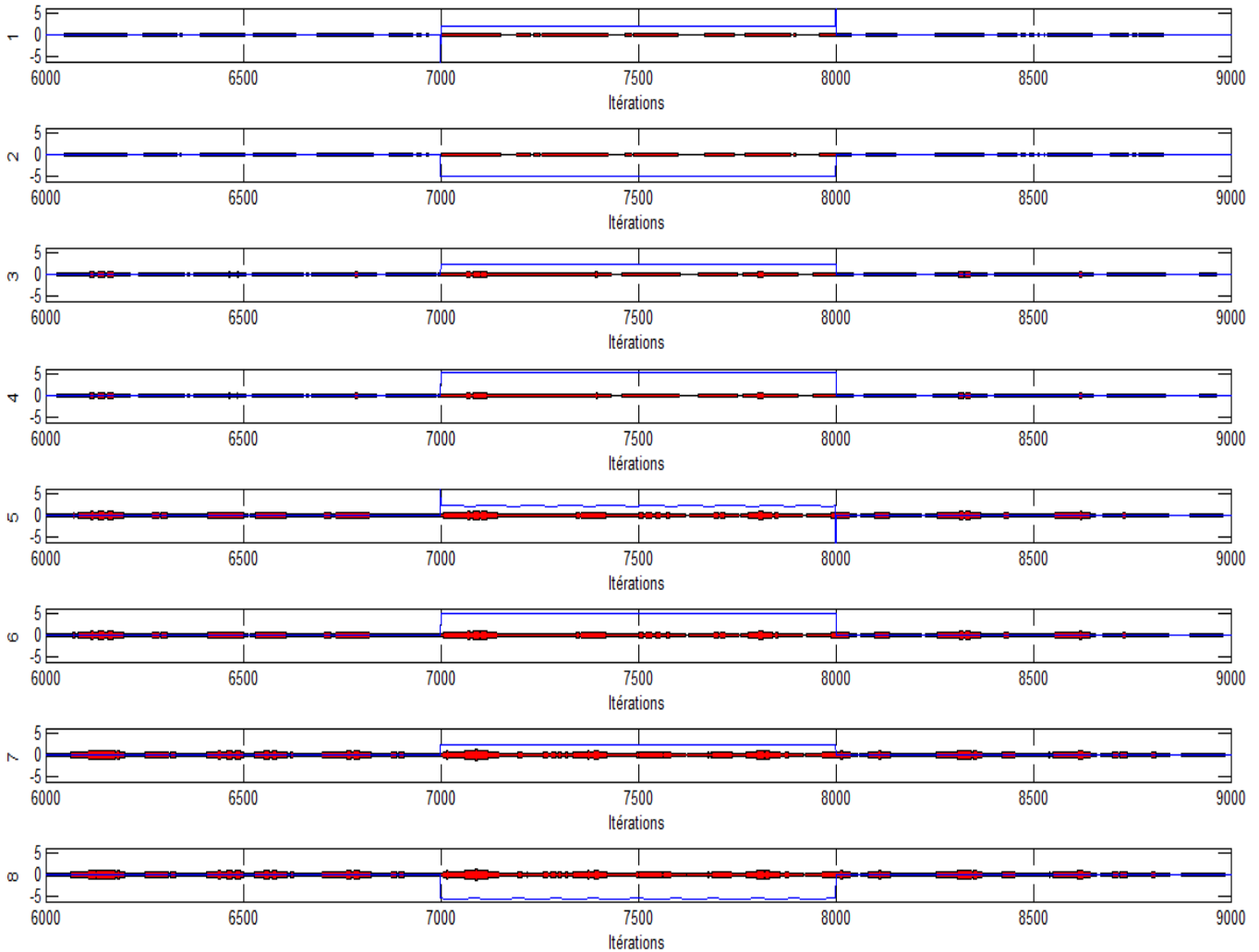


Fig. 6 : Résidus des vecteurs de parité pour un défaut biais de 30 A sur $I_{\alpha s}$ et une incertitude de 5% sur R_r

On peut remarquer sur la figure 7 qu'avec un défaut de 5% supérieur à l'incertitude de 3%, le défaut apparaît clairement dans les résidus. En effet, le vecteur de parité calculé sort de l'enveloppe ce qui permet de le détecter. Cependant, la détection n'est pas parfaite car le vecteur de parité calculé oscille autour de zéro donc rentre transitoirement dans l'enveloppe. Une logique de décision peut être mise en place pour résoudre ce problème. La figure 8 présente les huit résidus obtenus. Les défauts sont clairement visibles et peuvent être aisément détectés.

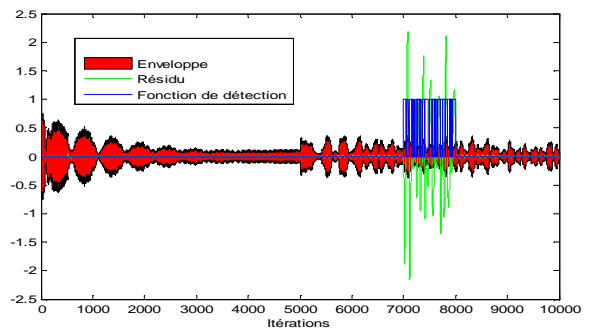


Fig. 7 : Défaut multiplicatif de 5% et incertitude de 3%

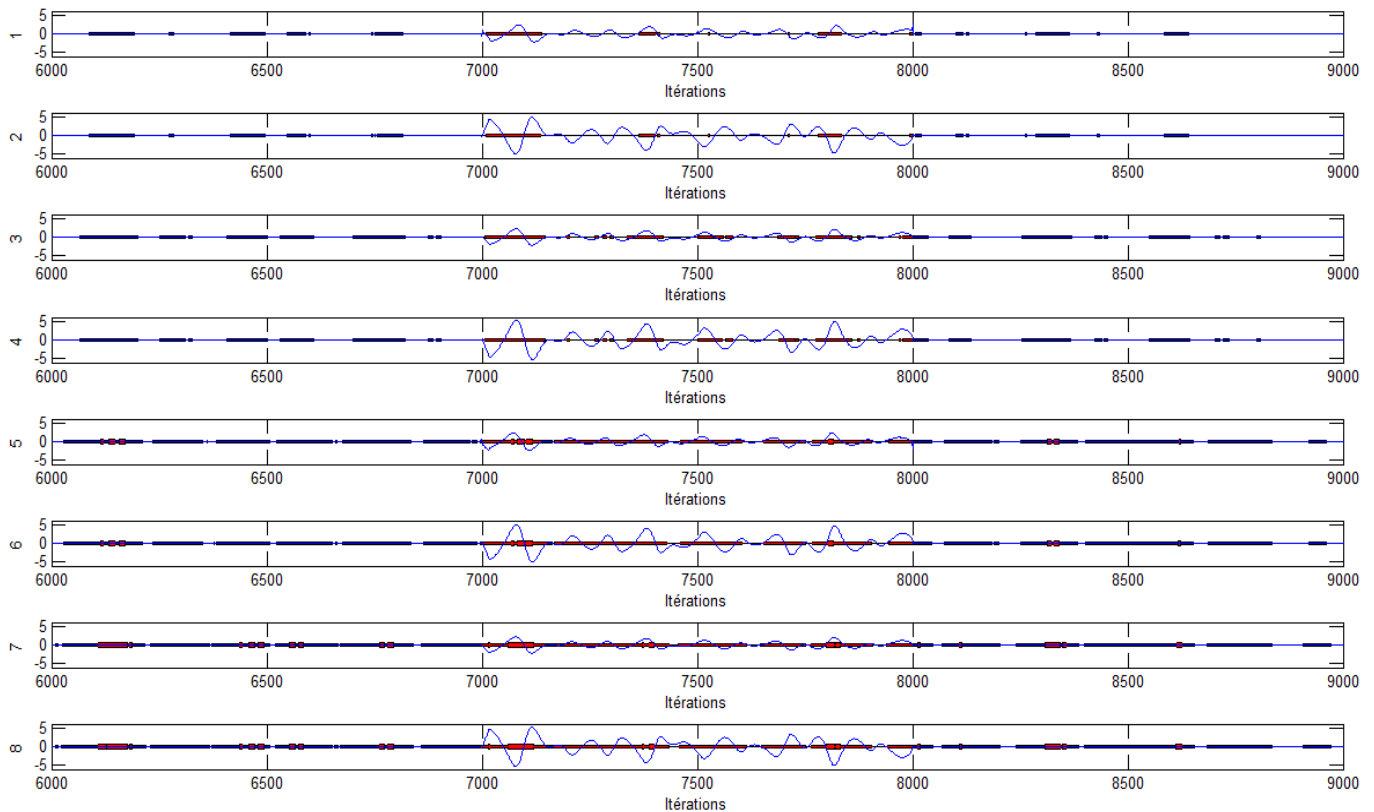


Fig. 8. : Résidus des vecteurs de parité pour un défaut multiplicatif de 5% et une incertitude de 3%

VI. CONCLUSION

La méthode d'analyse par intervalle à base de l'espace de parité permet de prendre en considération les incertitudes du modèle différemment des méthodes classiques. L'avantage de la méthode est que le seuil de détection est défini de manière naturelle par l'intermédiaire des incertitudes. L'inconvénient est qu'il n'est pas possible de détecter un défaut dans la zone d'incertitude délimitée par l'enveloppe. C'est pourquoi, il convient de faire un choix judicieux sur la taille des incertitudes. En effet, prendre des incertitudes trop fortes sur les paramètres engendrera de fortes non-détections. En revanche, prendre des incertitudes trop faibles sur les paramètres engendrera de fausses alarmes.

Il réside alors un dilemme, au moment de la conception, entre les incertitudes à prendre en compte sur le système et l'amplitude des défauts à détecter. Cependant, l'avantage de la méthode est que, si le vecteur de parité sort de l'enveloppe, on est sûr qu'un défaut a été détecté ; ce qui n'est pas le cas des méthodes classiques où les variations des paramètres du modèle engendrent des fausses détections de défauts.

Jusqu'ici, les résultats exposés se sont uniquement limités à un paramètre incertain. Actuellement, les travaux de recherche en cours visent à étudier les phénomènes de recouvrements et de couplages dans le cas de plusieurs paramètres incertains. De plus, l'étude réalisée porte uniquement sur la détection des défauts. La mise en place d'une procédure de localisation de défauts permettra de compléter ces travaux afin d'établir un diagnostic complet des défauts.

REFERENCES

- [1] Adrot O., Maquin D., et Ragot J. Diagnosis of an uncertain static system. *Proceedings of the 39th IEEE CDC*, vol. 4, pp. 4150-4154, 2000.
- [2] Armengol J., Trave-massuyes L., Vehi J., and De La Rosa J. L. A survey on interval model simulators and their properties related to fault detection. In 14th IFAC world congress, Beijing, China, 1999.
- [3] Bennouna O., Heraud N., Camblong H., et Rodriguez M. Diagnosis of the doubly-fed induction generator of a wind turbine. *Journal of Wind Engineering*, vol. 29, n° 5, pp. 431-448, 2005.
- [4] Bennouna O., Heraud N., et Kahyeh M. A. Diagnostic du générateur d'une éolienne à modèle incertain. In EPMRT, Evaluation des Performances et Maîtrise des Risques Technologiques, 2009.
- [5] Bennouna O., Heraud N., Rodriguez M., et Camblong H. Data reconciliation & gross error detection applied to wind power. *Journal of systems and control engineering*, vol. 221, pp. 497-506, 2006.
- [6] Chafouk H., Hoblos G., Langlois N., Le Gonidec S. et Ragot J. Soft computing algorithm to data validation in aerospace systems using parity space approach. *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 20, n° 3, pp. 165-171, 2007.
- [7] Chow et Willsky. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE AC*, vol. 29, pp. 603-614, 1984.
- [8] Desai M. N., Deckert J. C., Deyst J. J., Willsky A. S. et Chow, E. Y. Dual-redundant sensor FDI techniques applied to the NASA f8c-dfbw aircraft. In AIAA guidance and control conference, San Diego, California, USA, 1976.
- [9] Horak D. T., et Allison B. H. Failure detection and isolation methodology. In ACC, San Diego, California, USA, 1990.
- [10] Isermann R. Process fault detection based on modeling and estimation methods - a survey. *Automatica*, vol. 20, pp. 387-404, 1984.
- [11] Jaulin L. et Walter E. Guaranteed bounded-error parameter estimation for nonlinear models with uncertain experimental factors. *Automatica*, vol. 35, n° 5, pp. 849-856, 1999.
- [12] Patton R. J. et Frank P. M. Fault diagnosis in dynamic systems. Prentice hall, International series in systems and control engineering, 1989.
- [13] Potter J. E. et Suman M. C. Thresholdless redundancy management with arrays of skewed instruments. *AGARDograph 224, integrity in electronic flight control systems*, pp. 15.1-15.24, 1977.
- [14] Puig V., Stancu A. et Quevedo J. Robust fault isolation using nonlinear interval observers: the DAMADICS benchmark case study. In 16th IFAC world congress, Prague, République Tchèque, 2005.