

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE L'ELECTRONIQUE

كلية علوم الهندسة  
قسم الإلكترونيك

**THESE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat LMD 3<sup>ème</sup> cycle

Thème

Contribution à la commande et à la surveillance d'une éolienne

Option :

Automatique et Signaux

Par

**BOUMAIZA AHLEM**

**Jury :**

ABBASSI Hadj Ahmed	Prof.	Président	Université d'Annaba
ARBAOUI Fayçal	M.C.A.	Directeur de thèse	Université d'Annaba
SAIDI Mohammed Larbi	M.C.A.	Co- directeur de thèse	Université d'Annaba
MOUSSAOUI Abdelkrim	Prof.	Examineur	Université de Guelma
BOUDJEHEM Djalil	Prof.	Examineur	Université de Guelma
LAFIFI Mohamed Mourad	M.C.A.	Examineur	Université d'Annaba

Année 2018/2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَنُفِثَ بِفَيْحِ الرِّيحِ وَالسَّحَابِ

الْمُسْكِرِ بَيْنَ السَّمَاءِ وَالْأَرْضِ

لِأَبَاتِ قَوْمٍ يَعْلَمُونَ

صَلَّى اللَّهُ الْعَظِيمِ

# المساهمة في التحكم ومراقبة توربينات الرياح

## الملخص

بعد النمو السريع للتكنولوجيات الجديدة ، أصبحت الأنظمة الصناعية معقدة بشكل متزايد ، وأصبح التشغيل التشخيصي لكشف وتحديد مواقع الفشل التي تؤثر عليها أمراً ضرورياً لضمان السلامة التشغيلية وتوافر هذه الأنظمة .

في عالم يركز على الطاقات المتجددة، تتمتع الرياح بمستقبل مشرق وتشارك بقوة في إنتاج الطاقة الكهربائية في العالم الصناعي. مثل جميع الأنظمة الصناعية ، يمكن أن تهدد توربينات الرياح عن طريق الشذوذات التي قد تؤدي إلى تدهور أدائها ، ويمكن أن تؤدي إلى إغلاق كامل للتركيب.

الهدف الرئيسي من هذه الرسالة هو توقع ظهور خلل وظيفي، إما لتجنبه أو للحد من عواقبه. لقد استخدمنا تقنيات تشخيص الأخطاء المستندة إلى النماذج لاكتشاف وعزل أخطاء المستشعر والتحفيز في نظام VSWECS. انها تنطوي على استخدام منصة للمراقبة ومراقب لامركزي في وضع انزلاق (DSMO) ، التي يحددها تمثيل Quasi LPV polytopic هذا التمثيل يمكن أن يصف هذا النظام بأنه مزيج محدد من النماذج الفرعية، التي حددتها القمم من متعدد مقام محدد (polytope).

تتحقق شروط الاستقرار باستخدام اللامساواة الخطية لمصفوفة (LMI) .

في هذا العمل ، ركزنا على تقدير وإعادة تشكيل أخطاء المحرك وجهاز الاستشعار لضمان الكفاءة والتشغيل المستمر للنظام. تظهر نتائج المحاكاة التي يقدمها برنامج MATLAB / SIMULINK صحة وفعالية هذه الأساليب التشخيصية المقترحة.

## كلمات البحث:

مجموعة محدبة، Quasi LPV polytopic ، FDI ، DSMO ، VSWECS.

# Contribution to the Control and Monitoring of Wind Turbine

## Abstract

The rapid growth of new technologies, industrial systems are becoming increasingly complex and the diagnostic operation for detecting and locating failures that affect a system has become essential to ensure the operational safety and availability of these systems.

In a world more focused on renewable energies, wind energy has a bright future, and will be major contributor to the production of electrical energy. Like all industrial systems, the presence of possible anomalies can threaten wind turbine and could degrade its performances, even provoke a total shutdown of the installation.

The main objective of this thesis is to anticipate the appearance of such dysfunctions, either to avoid it or to limit their consequences. We used model-based fault diagnosis techniques in order to detect and to isolate sensor and actuator faults in the VSWECS. It involves using an observer bench and a sliding-mode decentralized observer (DSMO), designated by a polytopic Quasi LPV representation. The latter can describe this system as a convex combination of sub-models, defined by the vertices of a convex polytope . Stability conditions are achieved using matrix linear inequality (LMI).

In this work, we focused on estimating and reconstructing actuator and sensor faults to ensure efficiency and continuous system operation. The results of the simulation are presented by MATLAB/SIMULINK software to demonstrate the validity and effectiveness of these proposed diagnostic approaches.

## Keywords:

Polytopic Quasi LPV, convex combination, Fault Detection and Isolation (FDI), DSMO, VSWECS,

# Contribution à la Commande et à la Surveillance d'une Eolienne

## Résumé

Suite à la progression rapide de nouvelles technologies, les systèmes industriels sont de plus en plus complexes et l'opération de diagnostic qui consiste à détecter et localiser les défaillances qui les affectent est devenue indispensable pour assurer la sûreté de fonctionnement et la disponibilité de ces systèmes.

Dans un monde tourné vers les énergies renouvelables, l'éolien a un bel avenir et participe fortement à la production d'énergie électrique dans le monde industriel. Comme tous les systèmes industriels, l'éolienne peut être menacée par des anomalies susceptibles de dégrader ses performances, et peuvent provoquer un arrêt total de l'installation.

L'objectif principal de cette thèse, est d'anticiper l'apparition d'un dysfonctionnement, soit pour l'éviter, soit pour limiter ses conséquences. Nous avons utilisé des techniques de diagnostic de défauts à bases de modèle, afin de détecter et d'isoler les défauts des capteurs et des actionneurs dans le système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable (VSWECS). Il s'agit d'utiliser un banc d'observateurs et un observateur décentralisé à mode glissant (DSMO), désigné par une représentation Quasi LPV polytopique. Cette représentation peut décrire ce système comme une combinaison convexe de sous-modèles, définis par les vertices d'un polytope convexe. Les conditions de stabilité sont réalisées en utilisant l'inégalité linéaire matricielle (LMI).

Dans ce travail, nous nous sommes concentré sur l'estimation et la reconstruction des défauts des actionneurs et des capteurs afin de garantir l'efficacité et le fonctionnement continu du système. Les résultats de simulations présentés par le logiciel MATLAB/SIMULINK démontrent la validité et l'efficacité de ces approches de diagnostic proposées.

## Mots Clés :

Quasi LPV polytopique, combinaison convexe, FDI, DSMO, VSWECS,

## REMERCIEMENTS

La réalisation et l'aboutissement et de ce travail est le fruit de beaucoup d'années de formation et de recherches ; je tiens donc à remercier tous les enseignants du **département d'électronique**.

J'adresse mes sincères remerciements à ceux qui ont contribué à l'élaboration de ma thèse. Je tiens tout particulièrement à remercier en premier lieu **Mr ARBAOUI Fayçal** maître de conférences "A" à l'université Badji Mokhtar Annaba, en tant que Directeur de thèse qui a accepté de m'encadrer, pour ses précieux conseils, son ouverture d'esprit et surtout son intérêt porté à la science ce qui fait de lui une source à laquelle tout étudiant devrait s'abreuver. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance. Mes sincères remerciements vont également à **Mr Saïdi Mohammed Larbi** maître de conférences "A" à l'université Badji Mokhtar Annaba, mon Co-directeur de thèse, pour sa participation à ce travail. Je tiens à lui témoigner de mon appréciation envers ses qualités professionnelle et intellectuelles ainsi que ma profonde gratitude.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde reconnaissance à **Mr ABBASSI Hadj Ahmed** Professeur à l'Université d'Annaba, pour avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance.

Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury de soutenance, à savoir : **Mr MOUSSAOUI Abdelkrim** et **Mr BOUDJAHM Abdeljalil**, professeurs à l'université de Guelma et **Mr LAFIFI Mohamed Mourad M.C.A.** à l'université Badji Mokhtar Annaba pour avoir bien accepté d'être des examinateurs pour cette thèse.

Je tiens à remercier tous les amis qui m'ont aidée et encouragée pour réaliser cette thèse.

Enfin, un immense merci à mes amies et collègues du laboratoire d'automatique et signaux (LASA), pour tous les bons moments qu'on a passé ensemble.

# Dédicace

**Je dédie ce travail  
A ceux que j'aime  
Mon époux Hafid  
Qui m'a toujours encouragé et soutenu  
Et à ma petite Assil  
A ma très chère Mère et mon très cher Père  
Qui ont veillé pour mon bien être  
Et que je respecte infiniment, Le jour est venu  
Pour leur dire Merci...  
A mon cher frère Ilyes  
Et mes chères sœurs Samia, Loubna et Houda  
Et à mon neveu Wassim et mes nièces Eline et Lilian  
A toute la famille BOUMAIZA, BERREDJEM et KHAMMAR  
Mes derniers remerciements, et ce ne sont pas les moindres, vont  
À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à  
L'aboutissement de ce travail.**

# Table des matières

المخلص .....	i
Abstract .....	ii
Résumé.....	iii
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>iv</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>vi</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>ix</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre1 : Généralités sur l'éolienne</b> .....	<b>4</b>
1.1. Introduction :.....	5
1.2. Historique de l'éolien .....	7
1.3. Les principaux composants d'une éolienne .....	7
1.3.1. Description de fonctionnement .....	8
1.4. Classification des systèmes éoliens.....	9
1.4.1. Selon la vitesse de rotation .....	9
1.4.2. Selon l'orientation de l'axe de rotation .....	11
1.5. Description des pales d'une éolienne .....	13
1.5.1. Bilan des forces sur une pale .....	13
1.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne .....	14
1.6. La limite de Betz .....	17
1.7. Zones de fonctionnement.....	19
1.8. Stratégies de contrôled'une éolienne.....	20
1.9. Conclusion .....	23
1.10. Références :.....	24
<b>Chapitre2 :Représentation Quasi-LPV polytopique des systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable (VSWECS)</b> .....	<b>24</b>
2.1. Introduction :.....	25
2.2. Représentation des systèmes linéaire à paramètres variables (LPV) .....	25
2.3. Représentation d'état d'un modèle Takagi-Sugeno (T-S).....	27
2.4. Obtention des multi-modèles Takagi-Sugeno.....	29
2.5. Description du système éolien .....	29
2.5.1. Modèle aérodynamique .....	31
2.5.2. Modélisation du système à angle de calage.....	32

2.5.3.	Le train d'entraînement .....	33
2.5.4.	Modèle du générateur et convertisseur.....	35
2.6.	Représentation quasi-LPV d'un système VSWECS .....	36
2.6.1.	Représentation du Model Quasi-LPV Polytopique de VSWECS.....	38
2.7.	Conclusion : .....	41
2.8.	Références :.....	42
<b>Chapitre 3 : Diagnostic des défauts de VSWECS à base d'observateurs.....</b>		<b>42</b>
3.1.	Introduction :.....	43
3.2.	Notion de diagnostic et surveillance d'un système .....	43
3.3.	Définitions et terminologies.....	44
3.4.	Différents modes de fonctionnement d'un système .....	45
3.5.	Classification des défauts .....	45
3.4.1.	Défaut d'actionneur.....	46
3.4.2.	Défauts procédés .....	47
3.4.3.	Défauts capteurs.....	48
3.6.	Méthodologies de diagnostic avec / sans modèle .....	49
3.7.	Concepts de diagnostic à base de Modèle .....	50
3.7.1.	Génération des résidus : .....	51
3.7.2.	Évaluation des résidus : .....	51
3.8.	Diagnostic des défauts à base d'observateurs.....	51
3.8.1.	Observabilité des systèmes linéaires .....	51
3.8.2.	Synthèse d'observateurs pour un système linéaire.....	52
3.8.3.	Banc d'observateurs : .....	54
3.8.4.	Génération des résidus.....	56
3.9.	Observateurs non linéaires.....	56
3.9.1.	Observateur de Walcott et Žak .....	57
3.9.2.	Observateur à mode glissant utilisant une forme canonique .....	59
3.9.3.	Conception d'un modèle d'observateur décentralisé à mode glissant basé sur les techniques FDI. ....	59
3.9.4.	Reconstruction de défaut .....	62
3.10.	Conclusion :.....	63
3.11.	Références : .....	65
<b>Chapitre 4 : Applications et résultats .....</b>		<b>64</b>
4.1.	Introduction :.....	66

4.2.	Application de l'approche de détection des défauts de capteur et d'actionneur dans le système de calage à base de banc d'observateurs.....	67
4.2.1.	Description et modélisation du système .....	67
4.2.2.	Discussions des résultats : .....	70
4.3.	Application de l'approche de détection des défauts de capteur et d'actionneur à base de DSMO.....	74
4.3.1	Description et modélisation du système .....	74
4.3.2	Discussions des résultats : .....	75
4.4.	Conclusion .....	80
4.5.	Références :.....	81
	<b>Conclusion générale : .....</b>	<b>82</b>

## Liste des figures

Figure 1. Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions .....	5
Figure 2. Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde .....	6
Figure 3. Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables .....	6
Figure 4. Les principaux composants d'une éolienne .....	8
Figure 5. Différentes technologies d'éoliennes à axe vertical .....	11
Figure 6. Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontal .....	12
Figure 7. Bilan des forces sur une pale.....	13
Figure 8. Flux d'air sur un profil de pale " Stall " .....	14
Figure 9. Variation de l'angle de calage d'une pale .....	16
Figure 10. Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple .....	16
Figure 11. Représentation du tube de courant.....	17
Figure 12. Coefficient de puissance .....	19
Figure 13. Zones de fonctionnement d'une éolienne .....	19
Figure 14. Courbes de puissance pour différentes stratégies de contrôle.....	21
Figure 15. Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	30
Figure 16. Schéma des sous-modèles de système éolien.....	31
Figure 17. Le système hydraulique de l'angle du calage avec trois actionneurs .....	33
Figure 18. Le Schéma fonctionnel d'un modèle à angle de calage .....	33
Figure 19. Le modèle de train d'entraînement est ces quatre composantes. ....	34
Figure 20. Le système de convertisseur .....	35
Figure 21. Schéma fonctionnel d'un convertisseur.....	36
Figure 22. Zone de fonctionnement convexe du système.....	38
Figure 23. Espace polytopique avec quatre vertice .....	40
Figure 24. Différents types de défauts d'un système physique.....	46
Figure 25. Représentation graphique des défauts actionneur les plus répandues .....	46
Figure 26. Évolution temporelle d'un défaut (a) Abrupt, (b) Dérive, (c) Valeurs aberrantes ..	47
Figure 27. L'effet de différents types de défauts capteur sur les mesures.....	48
Figure 28. Défaut additif .....	49
Figure 29. Défaut multiplicatif.....	49
Figure 30. Classification des méthodologies de la surveillance. ....	50
Figure 31. Principe de la surveillance à base de modèle. ....	50
Figure 32. Une structure générale d'un générateur de résidu. ....	51

Figure 33. Schéma de principe d'un observateur .....	52
Figure 34. Diagramme structurel d'observateur de Luenberger .....	53
Figure 35. Observateur DOS pour la détection des défauts capteurs.....	55
Figure 36. Observateur GOS pour la détection des défauts capteurs.....	55
Figure 37. Réponse à un échelon du modèle pitch hydraulique dans différentes conditions. ..	67
Figure 38. Evaluation des mesures (en noir sans défaut) et (en rouge avec défaut) concernant la pale1 .....	70
Figure 39. Reconstruction de défaut de capteur dans le système de calage 1 .....	71
Figure 40. 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.....	72
Figure 41. Reconstruction de défaut de capteur et d'actionneur dans le système de calage 3 .	73
Figure 42. Variables de prémisses : fonctions d'appartenance triangulaire (en haut) et évolutions temporelles (en bas).....	76
Figure 43. Évolution des états réels (ligne bleue) et estimés (ligne rouge) du DSMO basé sur le système VSW ECS .....	77
Figure 44. Angle de calage réel et estimé (en haut) et le vecteur de défaut d'actionneur reconstruit ( $\beta$ ) (en bas).....	78
Figure 45. Couple du générateur réel et estimé (en haut) et le vecteur de défaut d'actionneur reconstruit ( $T_g$ ) (en bas).....	78
Figure 46. Angle de calage réel et estimé (en haut) et le vecteur de défaut du capteur reconstruit ( $\beta$ ) (en bas).....	79

## Liste des tableaux

Tableau 1. Classification des turbines éoliennes.....	13
Tableau 2. Description des paramètres du multiplicateur .....	35
Tableau 3. Paramètres de modèle de référence de l'éolienne .....	36
Tableau 4. Modèles Polytope de vertices .....	40
Tableau 5. Signatures des défauts de capteurs.....	56
Tableau 6. Paramètres du système pitch sous des différentes conditions.....	67

## Liste des acronymes

<b>DSMO</b>	Decentralized sliding mode Observer (Observateur à Mode Glissant Décentralisé)
<b>FDI</b>	Fault Detection and Isolation (Détection et Isolation des Défauts)
<b>LMI</b>	Linear Matrix (ces) Inequality(ies) (Inégalité Matricielle Linéaire)
<b>LPV</b>	Linear Parameter Varying (Linéaire à Paramètre Variant)
<b>LTI</b>	Linear Time Invariant (Linéaire à Temps Invariant)
<b>LTV</b>	Linear Time Variant (Linéaire variant dans le temps)
<b>MIMO</b>	Multi Input Multi Output (Multi-Entrées Multi-Sorties)
<b>Quasi-LPV</b>	Quasi Linear Parameter Varying (Quasi Linéaire à Paramètre Variables)
<b>SMO</b>	Sliding Mode Observer (Observateur à Mode Glissant)
<b>TPC</b>	Transformation Polytopique Convexe
<b>T-S</b>	Takagi-Sugeno
<b>VSWECS</b>	Variable Speed Wind Energy Conversion System (Système de Conversion d'Énergie Éolienne à Vitesse Variable)
<b>WECS</b>	Wind Energy Conversion Systems (Système de Conversion d'Énergie Éolienne)

## **Introduction générale**

Le besoin des nouvelles sources d'énergies est nécessaire pour la production vu le 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.

Sur le plan international ratifié en 1997 le protocole de Kyoto impose notamment une réduction des émissions de gaz à effet de serre qui intervient dans le processus de changements climatiques. Cela impliquera une réduction importante de l'utilisation des énergies fossiles et un recours plus important aux énergies non ou peu émettrices de gaz à - effet de serre : les énergies renouvelables seront donc indispensables.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres.

En ce sens, l'énergie éolienne se révèle une sage solution, c'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. Chaque MWh d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 de tonne de CO<sub>2</sub> rejeté chaque année par la production d'électricité d'origine thermique. Toutefois le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance.

Suite à la progression rapide des nouvelles technologies, les systèmes industriels en général et les systèmes éolien sont de plus en plus complexes et l'opération de diagnostic qui consiste à détecter, à localiser les défaillances ou/et les défauts qui affectent un système est devenu nécessaire pour assurer la sûreté de fonctionnement et la disponibilité de ces systèmes.

Le challenge de l'industrie moderne est la réduction des coûts et la diversification de la production. Or le diagnostic, permet d'améliorer la qualité et réduit les coûts en intervenant au cours de certaines phases du cycle de vie d'un produit.

Seulement, un système est complexe et la phase de détection et de localisation d'un ou plusieurs défauts est nécessaire mais n'est pas suffisante pour garantir la sûreté de

fonctionnement car il est indispensable de modifier la loi de commande en temps réel afin de maintenir la stabilité du système et de garantir ainsi un fonctionnement acceptable en mode dégradé. Ainsi, il est essentiel d'associer au diagnostic une loi de contrôle tolérante aux défauts.

Le contrôle tolérant aux défauts a pour but de s'accommoder automatiquement de l'effet des défauts tout en étant capable de maintenir la stabilité et au mieux les performances nominales du système et d'éviter l'arrêt immédiat et de permettre son fonctionnement en mode dégradé. Le problème majeur rencontré pour la conception de telles lois de commande est que la plupart des techniques de diagnostic sont développées comme un outil de surveillance.

Le système éolien est de plus en plus complexe et peut être menacé par des anomalies qui dégraderaient ses performances et pourrait provoquer un arrêt total de l'installation. Par conséquent, les méthodes de diagnostic des défauts sont devenues obligatoires et nécessaires, afin d'anticiper l'apparition d'un dysfonctionnement, soit pour les éviter, ou bien pour en limiter les conséquences.

Il existe une multitude de méthodes de diagnostic qui sont classées par différentes façon. Une de ces classifications consiste à regrouper les méthodes de diagnostic en deux catégories : l'approche à base de modèle et l'approches sans modèle. Parmi les méthodes de diagnostic à base de modèle on peut citer : l'espace de parité, l'estimation paramétrique, et l'observateur. Les méthodes de diagnostic à base d'observateurs ont reçu une attention particulière de la communauté scientifique à cause de leurs efficacités. Différents types d'observateurs ont été utilisés dans ce but, particulièrement les observateurs à mode glissant qui sont utilisés depuis plus de 18 ans avec un grand succès dans le cadre de la détection et de la reconstruction de défauts.

Le principe fondamental de détection des défauts à base d'observateurs est de réaliser une estimation des sorties du système à partir des grandeurs accessibles à la mesure. L'erreur d'estimation formerait le vecteur résidu, par la suite une décision de la présence ou non d'un défaut est prise, en vérifiant le résidu s'il est statiquement nul ou non.

Plusieurs systèmes peuvent être décrits par des systèmes linéaires dont les paramètres varient au cours du temps (LPV). Dans l'approche classique de modélisation LPV, les fonctions de pondération ne sont pas utilisées ; ce sont les variables de décision qui servent à décrire les conditions de fonctionnement du système. La variable de décision est une variable exogène ou endogène du système, accessible par mesure et variant dans un ensemble compact de bornes

connues, si la variable est un signal endogène au système, la sortie par exemple, on parle alors de systèmes quasi-LPV, en pratique les systèmes LPV et quasi-LPV sont analysés de façon similaire.

La modélisation des systèmes LPV est aussi conduite moyennant le concept polytopique, cette méthode est basée sur la représentation du système LPV dans un polytope dont les vertices sont fixés par les valeurs limites des paramètres variant.

Nous nous intéressons à la représentation T-S des systèmes non linéaires ainsi qu'à la transformation par secteurs non linéaires qui permet d'obtenir de manière systématique un modèle T-S à partir d'un système non linéaire.

Dans ce travail on a utilisé les systèmes LPV polytopiques. Cette classe de système permet de représenter de manière exacte les modèles non linéaires sur un compact de l'espace d'état où le comportement dynamique du système LPV est donné sous une forme polytopique, qui permet de décrire le système originel en tant qu'une combinaison convexe de sous-modèles définis par les vertices d'un polyèdre convexe. Chaque modèle décrit le comportement du système dans une zone de fonctionnement particulière. Ces sous-modèles sont ensuite combinés en utilisant des fonctions de pondération convexes pour d'écrire le modèle global.

### **Cette thèse est organisée comme suit :**

**Le premier chapitre** donne des généralités sur les énergies renouvelables où la technologie éolienne est abordée et développée. Une description des différentes structures des systèmes éoliens, leurs avantages et leurs inconvénients est donnée ainsi que les différentes techniques de commande utilisées pour chaque structure.

Dans **le deuxième chapitre** sera abordé ; la représentation Quasi LPV polytopique de VSWECS (système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable) permettant décrire ce système comme une combinaison convexe de sous-modèles, définis par les vertices d'un polytope convexe. Les conditions de stabilité sont réalisées en utilisant l'inégalité linéaire matricielle (LMI). Ce chapitre est aussi dédié à l'étude de l'approche multi-modèle qui permet de représenter le système dynamique non linéaire comme une combinaison d'un ensemble de modèles linéaires valables dans des zones de fonctionnement.

**Le troisième chapitre** donne un aperçu sur diagnostic et son principe. Les différentes étapes et différentes méthodes pour la génération de résidus à base de modèle ainsi que les fondements du diagnostic à base d'observateurs sont données de manière non exhaustive.

La contribution de cette thèse réside dans l'élaboration d'une méthode de diagnostic des systèmes non linéaires à base d'observateur décentralisé à mode glissant basé sur les techniques FDI. Cette méthode est fondée sur une transformation en l'état d'un système non linéaire MIMO.

L'objectif souhaité est que l'observateur devrait être robuste pour la commande tout en étant sensible aux défauts pour le diagnostic.

**Dans le quatrième chapitre**, qui représentera la partie principale de cette étude, on envisage de traiter le système VSWECS et les majeurs défauts qui peuvent affecter ce système (capteurs, actionneurs) pour les détecter et les isoler. Il s'agit d'utiliser un banc d'observateurs et un observateur décentralisé à mode glissant (DSMO), puis de présenter les résultats de simulation afin de les étudier et de les interpréter.

Enfin, ce travail sera achevé par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche à envisager.

### **Publications et Conférences Internationaux :**

Boumaiza A, Arbaoui F, Saïdi M.L. Intelligent condition monitoring of variable speed wind energy conversion systems based on decentralized sliding mode observer. *Advances in Modelling and Analysis C*. Vol. 73, No. 2, June 2018, pp. 37-44. [https://doi.org/10.18280/ama\\_c.730202](https://doi.org/10.18280/ama_c.730202)

Boumaiza A, Arbaoui F, Saïdi M.L. Diagnostic des défauts à base d'observateur dans un système éolien. *Mediterranean Journal of Modeling and Simulation (MJMS)*. ISSN: 2335-1357. Vol. 01, N°01, P. 045-055. Mars 2014.

Boumaiza A, Arbaoui F, Saïdi M.L. Diagnostic des défauts à base d'observateur dans un système éolien. *International Conference on Electrical Energy and Systems (ICEES)* October 22-24, 2013, Annaba, Algeria.

Boumaiza A, Arbaoui F, Saïdi M.L. Détection et localisation des défauts à base d'observateurs pour un système éolien. *International Conference on Systems and Processing Information*, May 12-14, 2013, Guelma, Algeria.

# **Chapitre1 : Généralités sur l'éolienne**

## 1.1. Introduction :

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. En effet, la consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître (figure 1) [1] posant des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétiques.

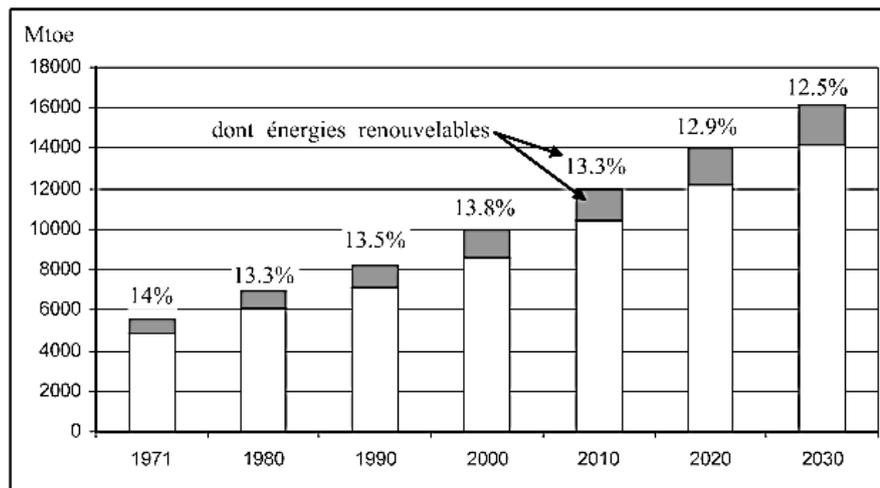


Figure 1. Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La figure 2 montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles.

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs [1].

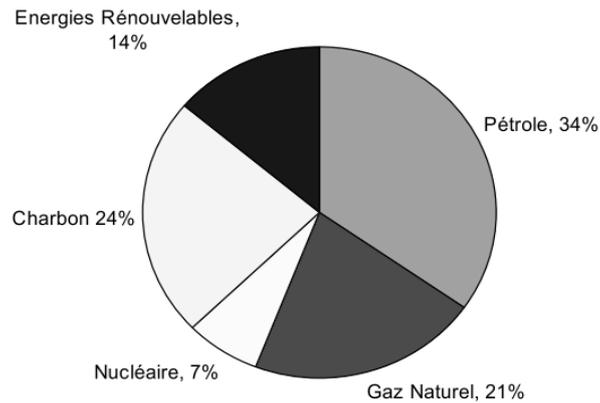


Figure 2. Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde

Il existe trois grandes familles émergent des énergies renouvelables et qui sont l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...), sachant que à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre.

Toutes les ressources renouvelables sont en forte croissance (figure 1). La figure 3 donne la vue sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que leurs prévisions pour les années à venir [1].

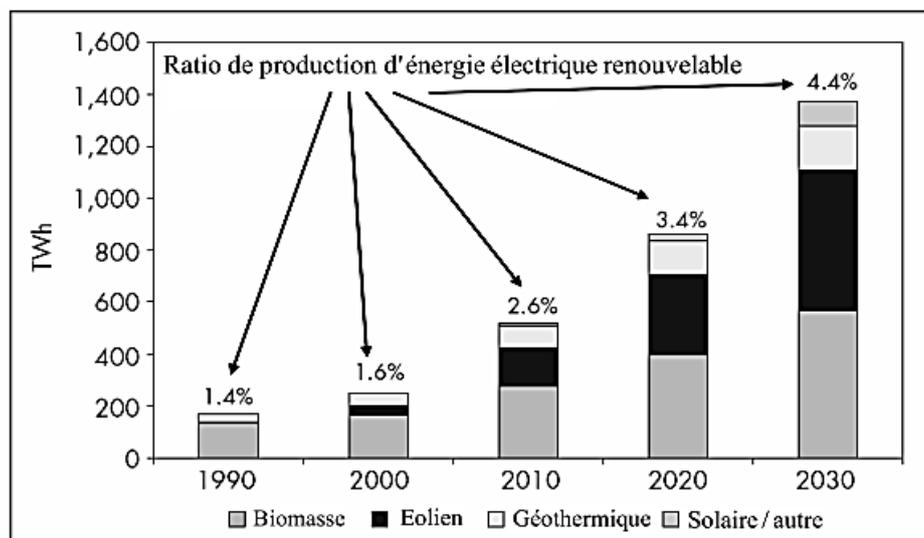


Figure 3. Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables [1]

## 1.2. Historique de l'éolien

L'énergie éolienne est aujourd'hui la source renouvelable non conventionnelle la plus compétitive et qui a le taux de croissance le plus élevé, elle représente déjà une des formes d'énergie les plus importantes pour la production d'énergie électrique [2].

L'énergie éolienne est la première forme d'énergie qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ, Hammourabi fondateur de la puissance de Babylone avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnaient dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde.[1]

## 1.3. Les principaux composants d'une éolienne

D'après la figure 4 on distingue les composants suivants :

- |                       |                         |                         |                  |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| 1-pale                | 2-moyeu                 | 3-arbre de transmission | 4-multiplicateur |
| 5-frein à disque      | 6-arbre rapide          | 7-génératrice           |                  |
| 8-système de commande | 9-système d'orientation | 10-le mat ou la tour    |                  |

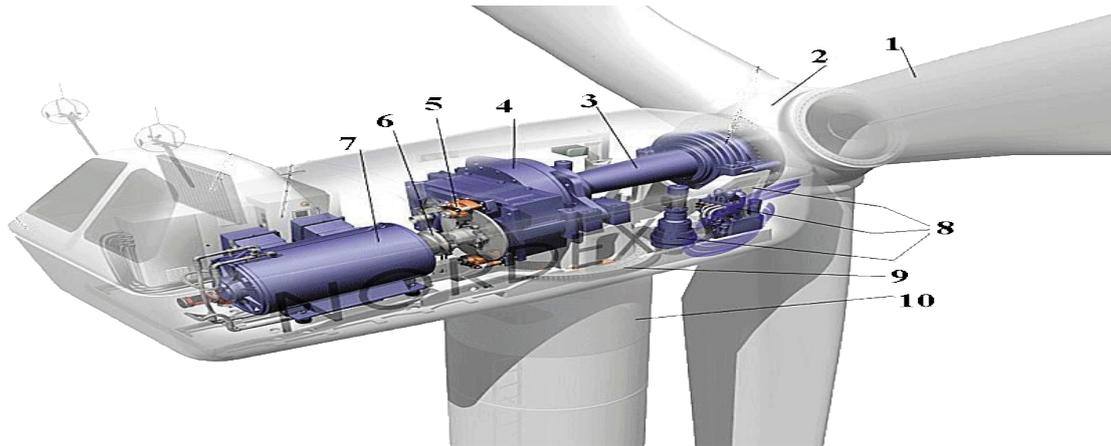


Figure 4. Les principaux composants d'une éolienne

### 1.3.1. Description de fonctionnement

**Le mat** : Place l'éolienne à une certaine distance du sol, selon la configuration du terrain et les vents de ces lieux. Pour augmenter l'efficacité d'une éolienne la nacelle s'oriente pour être toujours face au vent. Dans **la nacelle** le mouvement de rotor est transmis à l'arbre lent. La vitesse de rotation de **l'arbre lent** est augmentée par **le multiplicateur** (la boîte de vitesse de l'éolienne) pour atteindre une vitesse beaucoup plus élevée compatible avec la plage de vitesse de fonctionnement du générateur électrique.

**Le générateur** fonctionne sur le principe de dynamo. Il transforme l'énergie du vent en électricité. **Le frein d'urgence** permet de stopper le mouvement de rotation de rotor en cas d'urgence.

\* Sur le toit en trouve :

**Les capteurs** pour le pilotage d'éolienne

**Feux d'obstacle** : élément de sécurité qui permet au trafic aérien de repérer l'éolienne à distance.

**Paratonnerre** : protéger l'éolienne contre la foudre.

**Anémomètres** : mesure la vitesse de vent et permet de l'arrêter.

**La girouette** : indique la direction de vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.

**Quatre moteurs puissants** : font piloter la nacelle pour s'orienter dans la direction de vent.

- Le courant se transporte en bas du **mat** passe par le convertisseur qui synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau électrique.

- Le courant est transformé en électricité haute tension et passe ainsi de 690 V à 30.000 V grâce au transformateur. Cette électricité produite par l'éolienne est envoyée vers le poste source ; ce dernier étant composé d'un transformateur et d'un disjoncteur. **Le transformateur** élève la tension électrique de 30.000 à 225.000 V. **Le disjoncteur** protège le réseau électrique de la surtension. **Le poste source** permet de distribuer l'électricité sur l'ensemble de réseau électrique.

#### 1.4. Classification des systèmes éoliens

Plusieurs classifications des turbines éoliennes peuvent être considérées selon le critère choisi :

- Selon le mode de régulation de la vitesse du rotor ;
- Selon l'orientation de l'axe de rotation ;
- Selon le régime du fonctionnement ;
- Selon la taille ;
- Selon le mode d'exploitation.

Dans la suite, sont présentées les classifications les plus répandues.

##### 1.4.1. Selon la vitesse de rotation

Dans cette partie est présentée la classification selon le critère de la vitesse de rotation. En effet la turbine éolienne peut être à vitesse constante ou à vitesse variable.

##### 1.4.1.1 Turbines Eoliennes à vitesse constante

Les turbines éoliennes à vitesse constante sont les premières à avoir été développées. Dans cette topologie, la génératrice utilisée fonctionne avec une vitesse rotorique limitée aux alentours d'une vitesse constante. Cette génératrice peut être directement couplée au réseau électrique où sa vitesse de rotation est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles. Elle peut être couplée à une charge électrique isolée ou enfin peut être couplée à un système de stockage d'énergie (dans des accumulateurs) ou à un réseau autonome.

L'entraînement de la génératrice par un multiplicateur permet d'adapter sa vitesse rapide à la vitesse lente de la turbine qui est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales. Cependant la dynamique relativement lente du système d'orientation des pales dans des variations rapides de la vitesse du vent ou de la charge électrique amène ce type d'éolienne à suivre approximativement la caractéristique de réglage.

En conséquence, la puissance générée par cette éolienne peut avoir des caractères très fluctuants, ce qui n'offre pas de possibilité de réglage de la puissance générée par la turbine [3].

#### **1.4.1.2 Turbines Eoliennes à vitesse variable**

Les turbines à vitesse variable peuvent produire de 8 à 15 % plus d'énergie que les turbines à vitesse constante qui sont caractérisées avec un rendement considérablement limité.

L'idée de cette topologie est de réaliser un générateur à vitesse variable fonctionnant pour une large gamme de vent donc la vitesse de rotation doit être adaptée par rapport à la vitesse du vent afin de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les efforts mécaniques à vitesse variable du vent. La vitesse de rotation est régulée de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale atteinte par la caractéristique de l'éolienne (vitesse-puissance) : c'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking ou MPPT.

Ces turbines sont caractérisées par une intégration meilleure dans le réseau électrique ainsi que par un bruit et nuisances sonores réduits lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent car la vitesse des turbines est alors lente.

Pour toutes ces raisons, les turbines éoliennes raccordées aux réseaux électriques fonctionnent de plus en plus à vitesse variable. Ces systèmes ne nécessitent qu'un système simplifié d'orientation des pales, car la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesses de vent élevées. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe [3].

### 1.4.2. Selon l'orientation de l'axe de rotation

L'aérogénérateur est un dispositif utilisé pour le transfert de l'énergie cinétique du vent vers l'arbre de transmission en mouvement rotatif. Plusieurs types existent, se caractérisant par la position de leur axe de rotation et ses performances.

#### 1.4.2.1 Aérogénérateurs à axe vertical

Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. De nombreuses variantes ont vu le jour mais rares sont celles qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ce type d'éolienne a été de plus en plus abandonné au profit des éoliennes à axe horizontale [4] à cause des différents inconvénients qu'il a posés, comme les problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol, voir figure 5.

##### *Avantages :*

- Faible bruit (lente).
- Machine au sol.

##### *Inconvénients :*

- Rendement faible

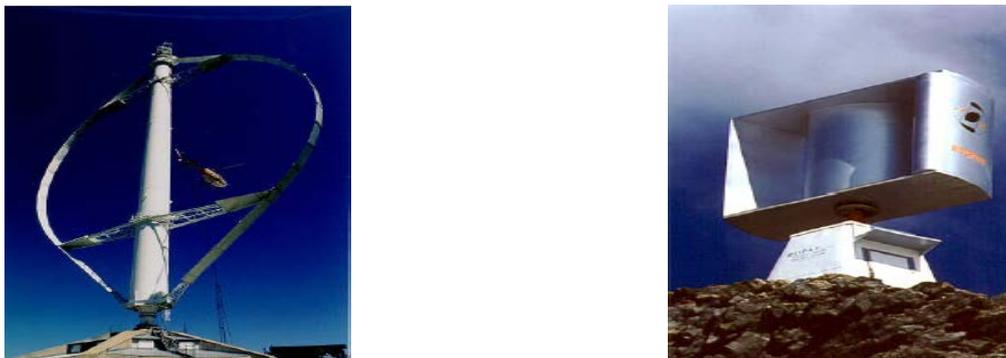


Figure 5. Différentes technologies d'éoliennes à axe vertical

#### 1.4.2.2 Aérogénérateurs à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde. Ce système se base sur le principe de portance aérodynamique. Les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine [4].

Les éoliennes généralement utilisées pour la production d'électricité sont des éoliennes rapides à 2 ou à 3 pales, ceci pour plusieurs raisons :

- Elles sont légères donc moins chères.
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilisé présente un rapport de multiplication moins important d'où sa légèreté.
- Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible donc un fonctionnement à faible vitesse de vent. Ces raisons expliquent notre restriction à ce type d'aérogénérateur dans la suite de notre travail, voir figure 6.

**Avantages :**

- un coût moins important.
- contraintes mécaniques minimales.
- vitesse rapide.

**Inconvénients :**

- source de bruit.



Figure 6. Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontal

Le tableau 1 présente une classification des turbines éoliennes selon la taille [5].

Tableau 1. Classification des turbines éoliennes selon la taille.

Dénomination	Diamètre du rotor (m)	Aire balayée (m <sup>2</sup> )	Puissance (kW)
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.25
Mini	1.25-3	1.2-7.1	1.5
Domestique	3-10	7-79	15
Petite commerciale	10-20	79-314	100
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	1000
Grande commerciale	50-100	1963-7854	3000

### 1.5. Description des pales d'une éolienne

Les pales de l'éolienne sont fixées en haut du mât, permettant de capter la puissance du vent et le transmet au rotor, et leur mouvement actionne le générateur qui produit ainsi de l'électricité.

Dans la plupart des aérogénérateurs le nombre de pales est de trois, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et les raisons de stabilité. Le nombre de pales peut varier en fonction des conditions climatiques :

- En effet, moins il y a de pales et plus l'éolienne tourne vite.
- Par contre, plus il y a de pales, plus l'éolienne peut capter des vents faibles [6].

Les modèles de pales sont le plus souvent calqués sur les ailes d'un avion.

#### 1.5.1. Bilan des forces sur une pale

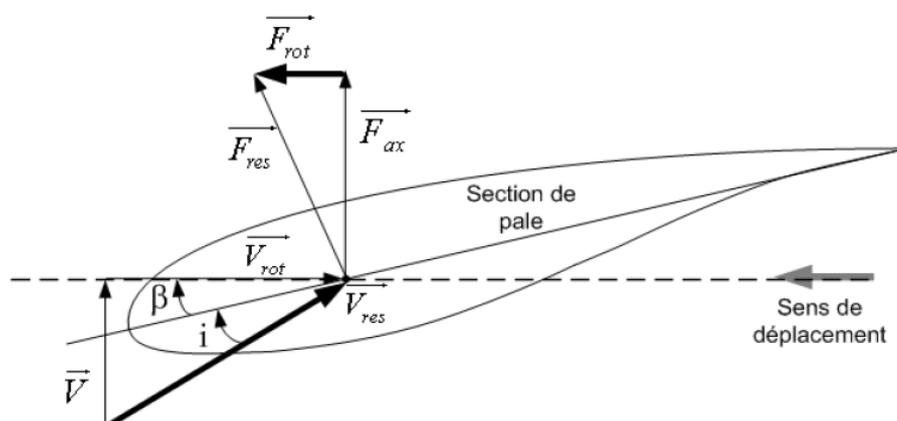


Figure 7. Bilan des forces sur une pale [7]

La figure 7 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $\vec{V}_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $\vec{F}_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $\vec{F}_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $\vec{F}_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée et lorsque la vitesse du vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale  $\beta$  et  $i$  sont respectivement l'angle de calage et l'angle d'incidence [7].

### 1.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

Dans le cas de fortes valeurs de vitesse du vent, il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les éoliennes sont donc conçues avec un système de régulation de la puissance avec deux manières différentes de contrôler en toute sécurité la puissance d'une éolienne moderne [8] :

#### 1.5.2.1 Système à décrochage aérodynamique "Stall"

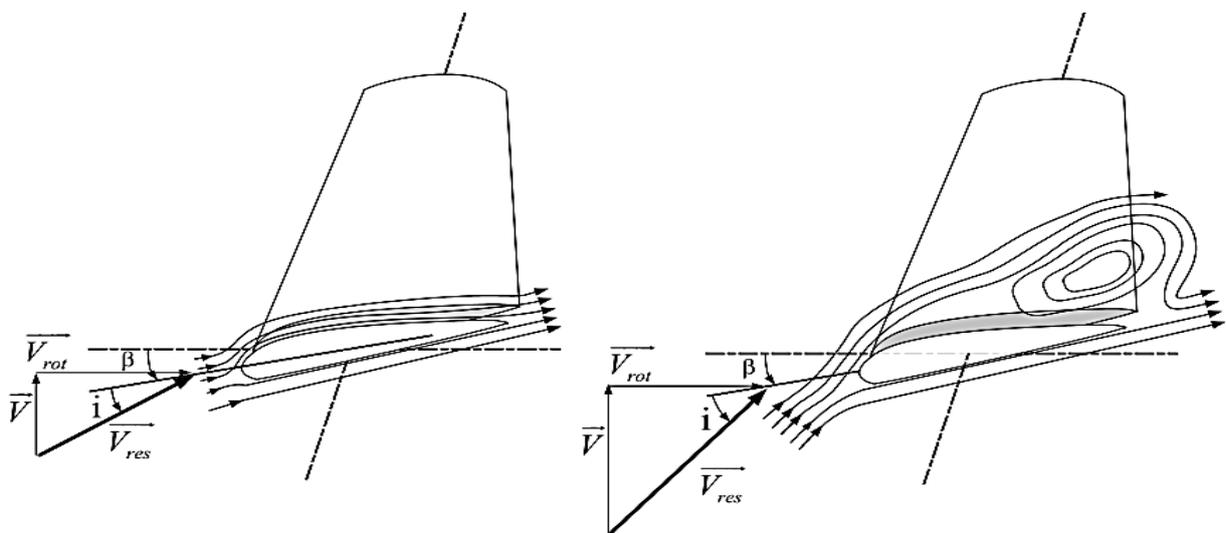


Figure 8. Flux d'air sur un profil de pale " Stall "[7]

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de

limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique, lorsque l'angle d'incidence  $i$  devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale  $V_n$ , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (figure 8) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance, ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales, donc de leur état de propreté. Il peut dans certains cas être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses du vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage  $\beta$  et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. Ainsi la répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [7].

### 1.5.2.2 Système d'orientation des pales "pitch"

L'angle d'incidence  $i$  peut être diminué (ou augmenté) fortement par augmentation (ou diminution) de l'angle de calage  $\beta$  de quelques dizaines de degrés ( $20^\circ$  à  $30^\circ$  généralement). Les forces aérodynamiques s'exerçant sur les pales sont donc ainsi réduites (à la fois pour la portance et pour la traînée) (figure 7 et 9). Le couple est maintenu pratiquement constant et peut être annulé par « mise en drapeau » des pales ( $\beta = 90^\circ$ ), la puissance est donc limitée.

#### *Avantage :*

La diminution de l'angle d'incidence  $i$  jusqu'à une valeur nulle ou négative limite toutes les forces aérodynamiques sur les pales, ce qui réduit considérablement les efforts à vitesse de vent élevée. Comme la force de poussée axiale est également diminuée, les efforts sur la tour sont réduits. Cet avantage est encore amplifié à vitesse variable puisque l'excès d'énergie pendant une rafale (dont la variation est trop brutale pour que le mécanisme d'orientation puisse compenser les effets) peut être stocké dans l'inertie du rotor par variation de sa vitesse (si le générateur l'accepte) alors que la puissance transmise reste pratiquement constante. Le frein mécanique n'est alors qu'un frein de « parking » [9].

La figure 10 montre l'influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple.

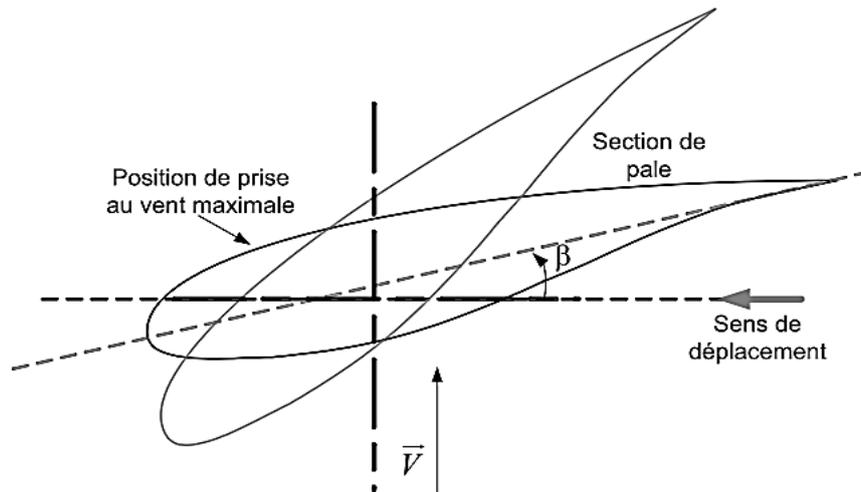


Figure 9. Variation de l'angle de calage d'une pale

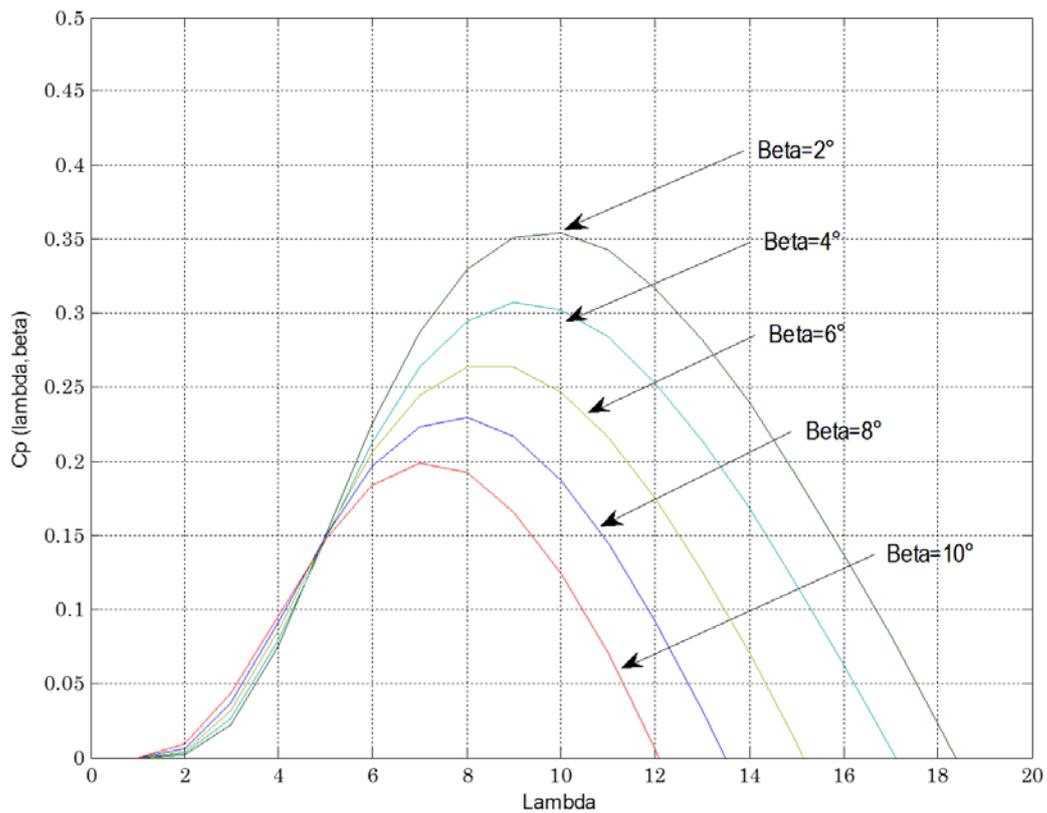


Figure 10. Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple

## 1.6. La limite de Betz

La théorie globale de la turbine éolienne à axe horizontal a été établie par **Betz** qui suppose que la turbine éolienne est placée dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse  $V_0$  et à l'infini en aval d'une vitesse  $V_2$ .

La production d'énergie ne pouvant se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique de l'air, la vitesse  $V_2$  est nécessairement inférieure à  $V_0$ . Il en résulte que la veine fluide traverse la turbine en s'élargissant voir figure 11[10], avec :

$V_0$  : vitesse axiale initiale du vent ;

$S_0$  : surface à l'entrée du tube de courant ;

$V$  : La vitesse du vent à la traversée de l'éolienne. (Au niveau de l'éolienne)

$V_2$  : vitesse du vent à l'aval du rotor ;

$S_2$  : surface à l'aval du rotor.

Pour déterminer les variations à travers le disque on applique les lois suivantes pour évaluer les performances d'un rotor :

- Loi de conservation de la masse.
- Loi de variation de la quantité de mouvement.
- Loi de variation d'énergie cinétique.

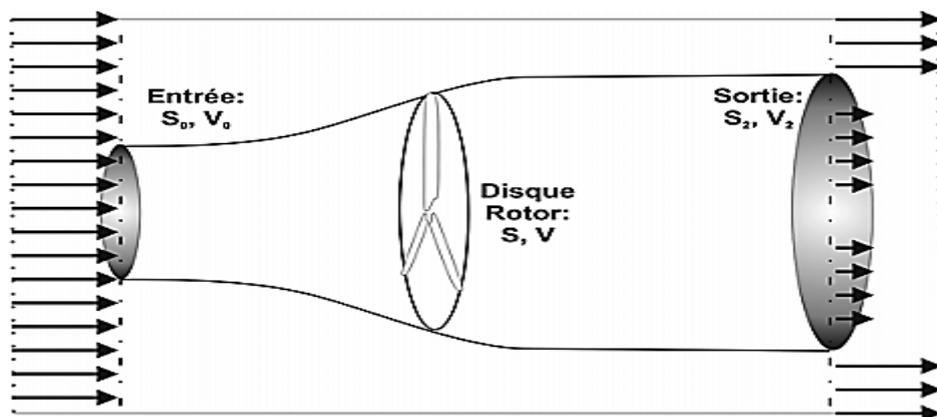


Figure 11. Représentation du tube de courant [10]

L'écoulement amont est supposé uniforme de vitesse  $V_0$ . Dans le cas d'une éolienne, le flux d'air traversant le disque rotor de surface  $S$  est ralenti et lui fournit de l'énergie (Loi de conservation de la masse), on a donc naturellement :

$$V_0 > V > V_2 \quad (1.1)$$

La loi de conservation de la quantité de mouvement donne les égalités suivantes :

$$S_0 V_0 = S V = S_2 V_2 \quad (1.2)$$

En notant  $\rho$  la masse volumique de l'air (en  $kg M^3$ ), la puissance absorbée par le rotor s'exprime sous la forme suivante :

$$P = \rho S V^2 (V_0 - V_2) \quad (1.3)$$

La variation de l'énergie cinétique de la masse d'air par seconde est donnée par :

$$\Delta Ec = \frac{1}{2} \rho S V (V_0^2 - V_2^2) \quad (1.4)$$

En effectuant le bilan énergétique, l'égalité des expressions (1.3) et (1.4) donne :

$$V = \frac{1}{2} (V_0 + V_2) \quad (1.5)$$

En dérivant l'expression de la puissance  $P$  par rapport à la vitesse  $V_2$  et en étudiant sa variation, on obtient alors une seule racine physique correspondant au maximum de la puissance absorbée par le rotor c.-à-d. susceptible d'être recueillie par les pales:

$$V_2 = \frac{V_0}{3}$$

Soit :

$$\begin{aligned} P_{MAX} &= \rho S \left( \frac{2}{3} V_0 \right)^2 \left( \frac{2}{3} V_0 \right) \\ &= \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho S V_0^3 \right) \\ \frac{16}{27} &\approx 0.593 \end{aligned}$$

Représente la fraction maximale de l'énergie passant dans le tube de courant théoriquement récupérable, c'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée (voir figure 12).

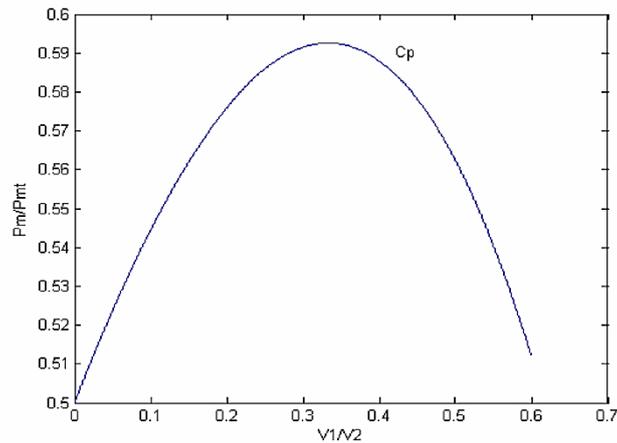


Figure 12. Coefficient de puissance

### 1.7. Zones de fonctionnement

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent (Figure 13)[9] :

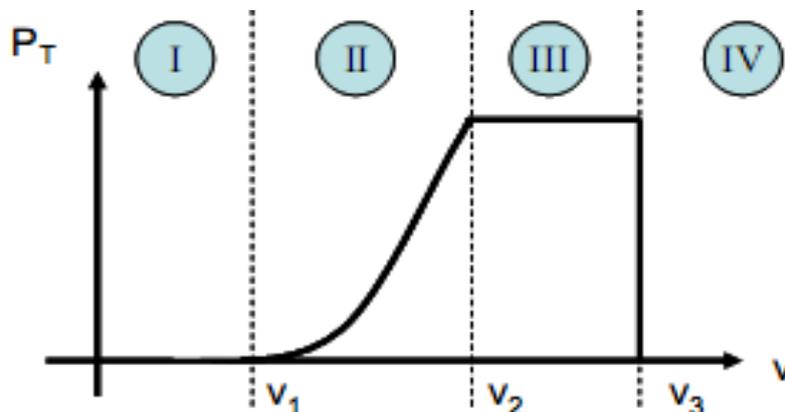


Figure 13. Zones de fonctionnement d'une éolienne [9]

$V_1$  : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine, suivant les constructeurs,  $V_1$  varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

$V_2$  : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs,  $V_2$  varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

$V_3$  : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales, pour la grande majorité des éoliennes,  $V_3$  vaut 25m/s.

**Zone I :  $V < V_1$  :**

La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

**Zone II :  $V_1 \leq V < V_2$  :**

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 :  $V_2 \leq V < V_3$  :**

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

**Zone IV :  $V > V_3$  :**

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

## **1.8. Stratégies de contrôle d'une éolienne**

Rappelons que le contrôle d'angle de calage de la pale et de la vitesse du générateur, sont les méthodes les plus efficaces pour régler la puissance de sortie. Les stratégies de contrôle suivantes utilisent le contrôle de l'angle de calage et de la vitesse du générateur pour gérer les fonctionnalités de la turbine tout au long de la courbe de puissance : vitesse fixe calage fixe (FS-FP), vitesse fixe calage variable (FS-VP), vitesse variable calage fixe (VS-FP) et vitesse variable calage variable (VS-VP).

La figure 14 montre les courbes de puissance pour différentes stratégies de contrôle expliquées ci-dessous, vitesse variable calage variable (VS-VP), étant la courbe idéale.

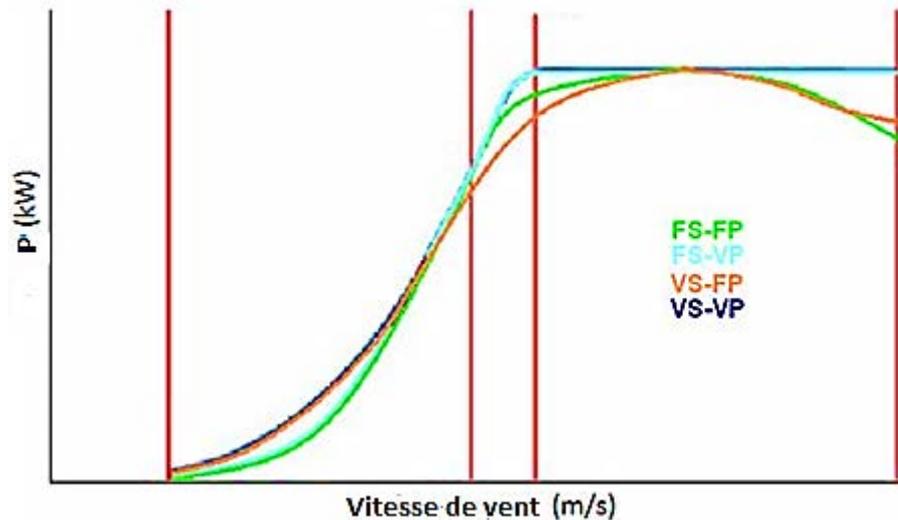


Figure 14. Courbes de puissance pour différentes stratégies de contrôle

La configuration vitesse fixe et calage fixe (FS-FP) est la variante où il est impossible d'améliorer les performances avec un contrôle actif. Dans cette conception, le générateur de la turbine est directement couplé au réseau électrique, ce qui permet de verrouiller la vitesse du générateur sur la fréquence du secteur et de fixer la vitesse de rotation. Ces éoliennes sont régulées par des méthodes de décrochage passif (passive stall) à des vitesses de vent élevées. La sélection du rapport de transmission devient importante pour cette commande passive car elle garantit que la puissance nominale ne soit pas dépassée. La figure 14 montre la courbe de puissance pour le fonctionnement en FS-FP.

La figure 14 montre clairement que la puissance réelle ne correspond pas à la puissance idéale, ce qui implique une capture d'énergie moindre. Notez que la turbine ne fonctionne au maximum de son efficacité qu'à une vitesse du vent dans la région à faible vitesse. La puissance nominale de la turbine n'est obtenue que pour une seule vitesse de vent. Cela implique une mauvaise régulation de la puissance due à des opérations contraignantes.

La configuration à vitesse fixe et calage variable (FS-VP) fonctionne à un angle de calage fixe inférieur à la vitesse nominale du vent et ajuste en permanence l'angle au-dessus de la vitesse nominale du vent. Pour clarifier, le fonctionnement à vitesse fixe implique une puissance de sortie maximale à une vitesse de vent. On peut utiliser à la fois les méthodes de contrôle d' hauteur et de décrochage dans cette configuration pour limiter la consommation. La figure 14 montre la courbe de puissance du système FS-VP en utilisant soit un contrôle d' hauteur, soit un contrôle de décrochage.

En deçà de la vitesse nominale du vent, la turbine FS-VP présente un rendement quasi optimal autour de la région II. Au-delà de la vitesse nominale du vent, les angles de calage changent en permanence, entraînant peu ou pas de perte de puissance.

La configuration à vitesse variable calage fixe (VS-FP) ajuste en permanence la vitesse du rotor par rapport à la vitesse du vent grâce à une électronique de puissance contrôlant la vitesse synchrone du générateur. Ce type de contrôle suppose que le générateur est issu du réseau, de sorte que son rotor et sa chaîne de transmission puissent tourner librement indépendamment de la fréquence du réseau. Le pas fixe s'appuie fortement sur la conception de la lame pour limiter la puissance via le décrochage passif. La figure 14 montre la courbe de puissance de VS-FP.

Cette même figure montre que l'efficacité énergétique est optimisée lorsque le vent est faible et que vous ne pouvez obtenir la puissance nominale de la turbine uniquement à une seule vitesse du vent. La régulation passive du décrochage joue un rôle majeur dans l'atteinte de la puissance nominale et peut être attribuée à une mauvaise régulation de la puissance supérieure à la vitesse nominale du vent. Lorsque la vitesse du vent est faible, VS-FP peut capter plus d'énergie et améliorer la qualité de l'énergie.

La configuration à vitesse variable et calage variable (VS-VP) est une dérivation de VS-FP et FS-VP. Fonctionnant en dessous de la vitesse nominale du vent, la vitesse variable et le calage fixe sont utilisés pour maximiser la capture d'énergie et améliorer la qualité de l'énergie. Fonctionnant au-dessus de la vitesse nominale du vent, la vitesse fixe et le calage variable permettent une régulation efficace de la puissance à la puissance nominale. La variante VS-VP est la seule stratégie de contrôle réalisant théoriquement la courbe de puissance idéale illustrée à la figure 14.

## **1.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les éoliennes ainsi que les différentes technologies de ces turbines et leurs composantes fondamentales.

Les deux configurations des éoliennes à axe vertical et horizontal ont été évoquées où nous avons accordé plus d'intérêt aux éoliennes à axe horizontale, ainsi que leur mode de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique), partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour la production de l'électricité.

Ensuite on a vu les différents profils de pale, le comportement de l'air puis on a donné une présentation des théories aérodynamiques de base nécessaire pour l'analyse de l'écoulement du vent à travers un rotor éolien. On a présenté une théorie générale de la mécanique (théorie de Betz). Cette démarche se caractérise par sa simplicité mais surtout par sa puissance dans la modélisation du fonctionnement d'une turbine éolienne. Cette démarche est associée aux équations exprimant l'effet aérodynamique du vent sur les pales de l'éolienne, puis on a montré quelles sont les différentes stratégies de contrôle appliquées à ces systèmes d'énergie.

Dans le chapitre suivant, nous allons examiner la modélisation de la turbine à axe horizontale qui est utilisé dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

**1.10. Références :**

- [1] Mirecki A .Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. France. 2005.
- [2] Arama F.Z, Bousserhane I.K, Laribi S, Sahli Y, Mazari B. Artificial Intelligence Control Applied in Wind Energy Conversion System. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). 2018; 9 (2):571-578.
- [3] Attoui I. Contribution au diagnostic de défauts d'une génératrice asynchrone dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2015.
- [4] <http://electronique1.blogspot.com>.2013
- [5] Ammour K, Mekelleche A. Commande de la vitesse d'une éolienne par l'approche multi-modèle. Mémoire de Master, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen. Algérie. 2014.
- [6] <http://eolienne.comprendrechoisir.com/comprendre>. 2013.
- [7] Poitiers F. Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes. 2003.
- [8] <http://www.windpower.org/fr/tour/index.htm> ,2013
- [9] Laverdure N .Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires .Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique De Grenoble.2005.
- [10] Rabin M, Noël J.M. Énergie éolienne (Principes - Études de cas). Dunod, Paris, 2010.

**Chapitre2 : Représentation Quasi-LPV polytopique des  
systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse  
variable (VSWECS)**

## 2.1. Introduction :

Les systèmes physiques réels sont souvent non linéaires, donc il est préférable de les représenter par des modèles LPV. L'avantage principal de ces derniers est qu'ils nous permettent d'appliquer des outils de conception linéaire robustes à des systèmes non linéaires complexes.

Cette approche consiste à appréhender le comportement global du système par un ensemble de modèles locaux (linéaires ou affines), chacun de ces modèles caractérise le comportement du système dans une zone de fonctionnement particulière. Les modèles locaux sont ensuite regroupés au moyen d'un mécanisme d'interpolation. Les modèles LPV décrivent la variation de la dynamique du système en fonction d'un ou de plusieurs paramètres variables, mais lorsque la variation des paramètres de prémisses dépend des variables de l'espace d'état et/ou des variables d'entrée, ils sont notés **Quasi-LPV**.

Récemment, la modélisation Quasi-LPV est devenue très appropriée pour modéliser une large catégorie de systèmes non linéaires ; l'utilisation de cette approche permet de transférer aux systèmes non linéaires plusieurs méthodes développées dans le domaine de la surveillance linéaire et donne de bonnes propriétés d'approximation pouvant être utilisées pour la surveillance.

Dans ce chapitre, le modèle dynamique Quasi-LPV est utilisé pour représenter le système non linéaire en utilisant la transformation polytopique pour décrire le système comme une combinaison convexe de sous-modèles, définis par les vertices (sommets) d'un polytope convexe.

L'objectif de cette section est de transformer le système non linéaire de l'éolienne en un système quasi-LPV avec une forme polytopique.

## 2.2. Représentation des systèmes linéaire à paramètres variables (LPV)

Les systèmes linéaires à paramètres variables (LPV) représentent une généralisation de la classe des systèmes à temps variant (LTV).

La principale différence provient de la particularité que pour les systèmes LPV, la dépendance temporelle est dissimulée dans les paramètres variables dans le temps  $\theta(t) \in \mathfrak{R}^l$ . Ces systèmes sont décrits par une représentation d'état de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\theta(t))x(t) + B(\theta(t))u(t) \\ y(t) = C(\theta(t))x(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

Ou  $A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathfrak{R}^{n \times m}$  et  $C \in \mathfrak{R}^{p \times n}$  sont des matrices représentant l'espace d'état continu avec des paramètres variables et  $\theta(t)$  est le vecteur des paramètres variables dans le temps [11].

L'utilisation du terme LPV suggère que les paramètres peuvent être connus en temps réel alors que le terme LTV signifie que le système est non stationnaire (modèle linéaire à coefficients variables dans le temps). De ce fait, un système LTV est un cas spécial d'un système LPV quand le vecteur des paramètres variants dans le temps est égal au temps, i.e.

$$\theta(t) = t, \quad l = 1$$

Il est possible de rapprocher des systèmes non linéaires par une classe spécifique de systèmes LPV appelé quasi-LPV lorsque certains éléments des paramètres variants  $\theta(t)$  sont choisis comme étant des signaux du système, la forme d'un modèle quasi-LPV n'est pas unique. A chaque représentation quasi-LPV correspond un ensemble particulier de variables. Ces systèmes sont obtenus via une transformation LPV directe ou en utilisant la représentation de Takagi-Sugeno .

### 2.2.1. Système LPV polytopique

La forme polytopique du système LPV est régie par les expressions suivantes :

$$\text{Avec : } \begin{cases} \sum_{i=1}^h \mu_i(\theta(t)) = 1 \\ \mu_i(\theta(t)) \geq 0, \quad h = 2^l \end{cases} \begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^h \mu_i(\theta(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^h \mu_i(\theta(t))(C_i x(t)) \end{cases} \quad (2.2)$$

Le terme polytopique vient du fait que le vecteur  $\mu(t)$  évolue dans un polytope défini par :

$$\Omega = \left\{ \mu_i(\theta(t)) \in R^h, \mu_i(\theta(t)) \geq 0, \forall i, \sum_{i=1}^h \mu_i(\theta(t)) = 1 \right\} \quad (2.3)$$

Il est important de noter que tout système à paramètres variants peut être exprimé comme un système polytopique. La modélisation LPV polytopique offre un cadre adéquat pour aborder

le problème d'observation et de diagnostic des systèmes notamment à l'aide de l'outil LMI [11].

La structure LPV peut être utilisée pour représenter le comportement de plusieurs systèmes dynamiques et également des défauts et des erreurs de modélisation.

L'idée à développer serait de réécrire le système quasi-LPV sous forme T-S en appliquant une succession de transformations polytopiques convexes. Il est important de souligner que l'écriture polytopique issue d'une représentation LPV peut généralement s'écrire de manière équivalente, au moins sur un compact de l'espace d'état, sous forme T-S. Inversement, un système T-S peut également être vu comme un système LPV. En effet, si les paramètres varient dans un ensemble compact, il est possible de manière directe et systématique, de réécrire ces modèles sous forme T-S. Cette idée est exploitée dans ce chapitre (estimation paramétrique) et y est largement détaillée.

Il existe donc un lien très étroit entre les représentations LPV et T-S : Les systèmes LPV peuvent décrire les modèles T-S si les "paramètres de décision" du premier paradigme sont traités comme des fonctions d'appartenance du second, et les systèmes vertices dans le cas LPV polytopique représentent les sous-systèmes dans le cas T-S [12].

### 2.3. Représentation d'état d'un modèle Takagi-Sugeno (T-S)

Dans cette section, nous expliquons qu'une modélisation T-S est basée sur une décomposition du comportement dynamique du système non linéaire autour de différentes zones de fonctionnement.

Soient  $F$  et  $G$  deux fonctions non linéaires. La représentation d'état du système est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F(x(t), u(t)) \\ y(t) = G(x(t)) \end{cases} \quad (2.4)$$

Le système non linéaire peut être représenté sous forme des modèles locaux obtenus après une transformation polytopique basée sur les limites des termes non linéaires

Le système (2.4) peut être représentée ou approximé par un modèle flou de Takagi-Sugeno (T-S). Le système T-S est formé d'une base de règles dont la  $i$ ème règle est de la forme :

Règle  $i$  : SI  $z_1$  et  $A_1^i$  et ... et  $z_r$  et  $A_r^i$

$$\text{ALORS} \begin{cases} \dot{x} = A_i x + B_i u \\ y = C_i x \end{cases} \quad (2.5)$$

Les matrices  $A_i, B_i$  et  $C_i$  peuvent être obtenues par une linéarisation autour d'un point de fonctionnement  $(x_i, u_i)$  qui correspond à  $z_i = [z_{i0}, z_{i1}, \dots, z_{ir}]^T$  dans la région floue décrite par la règle  $i$

$$A_i = \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{(x_i, u_i)}, \quad B_i = \left. \frac{\partial F}{\partial u} \right|_{(x_i, u_i)}, \quad C_i = \left. \frac{\partial G}{\partial x} \right|_{(x_i)}$$

Notons que  $(x_i, u_i)$  n'est pas forcément un point d'équilibre, ce qui signifie que des constantes doivent être obtenues pour chaque sous-système  $i$ . Le système global de T-S s'écrit alors :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^N h_i(z) (A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^N h_i(z) (C_i x(t)) \end{cases} \quad (2.6)$$

Les matrices  $A_i, B_i$  et  $C_i$  sont constantes et  $\{A_i, B_i\}$  sont des sous-modèles asymptotiquement stables. La structure T-S du modèle est décrite par les fonctions de pondération  $h_i(z)$ .

La fonction d'activation  $h_i(x(t), u(t))$  est normalisée ; elle détermine le degré d'activation de l' $i$ ème sous modèle associé, en fournissant une transition graduelle de ce modèle vers le modèle voisin. Ces fonctions sont généralement triangulaires ou gaussiennes et satisfont la propriété suivante :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N h_i(x(t), u(t)) = 1 \\ 0 \leq h_i(x(t), u(t)) \leq 1 \quad \forall i \geq 0 \end{cases}$$

Bien évidemment, l' $i$ ème modèle linéaire décrit la dynamique du système autour du  $i$ ème point de fonctionnement.

Pour  $r$  variables de prémisse, il y a  $N$  sous-modèles ayant la forme polytopique suivante [8] :

$$Ms(\theta) = \sum_{i=1}^N \mu_i Ms_i = \mu_{1,1} Ms_1 + \mu_{1,2} Ms_2 \dots + \mu_{\frac{N}{2},1} Ms_{N-1} + \mu_{\frac{N}{2},2} Ms_N$$

## 2.4. Obtention des multi-modèles Takagi-Sugeno

Afin d'obtenir un modèle T-S (2.6), on peut citer trois approches largement utilisées dans la littérature :

- La première approche repose sur les techniques **d'identification**. La structure du modèle ainsi que les fonctions d'activation sont tout d'abord choisies a priori. En utilisant des jeux de données d'entrées-sorties récoltées à partir des mesures effectuées sur le système réel, des techniques d'identification sont ensuite mises en place [9].
- La deuxième approche consiste à la **linéarisation** de modèle non linéaire autour de plusieurs points de fonctionnement et d'agréger l'ensemble à l'aide de fonction d'appartenance floues (triangulaires, trapézoïdales...). Il en résulte que le modèle T-S obtenu consiste en une approximation du modèle non linéaire puisque, dans ce cas, les fonctions d'appartenance choisies ne permettent pas forcément de caractériser, de manière exacte, les mécanismes d'interpolations non linéaires entre sous-systèmes [10].
- La troisième approche repose sur la transformation d'un système non linéaire affine en la commande, est basée sur une Transformation Polytopique Convexe (TPC) de fonctions scalaires origines du non linéarité. Cette approche est connue sous le nom de **transformation par secteur non linéaire**, et elle n'engendre pas d'erreur d'approximation. Elle a également l'avantage de réduire le nombre de modèles locaux par comparaison avec l'approche de linéarisation. En effet, c'est l'approche la plus utilisée dans des contextes comme l'analyse de stabilité des systèmes non linéaires représentés par un modèle T-S et la synthèse de régulateurs. L'approche par secteur non linéaire permet d'obtenir une forme T-S équivalente au modèle non linéaire sans perte d'information. Cette approche est moins conservative et est basée uniquement sur les bornes supérieures et inférieures des termes non linéaires. L'approche T-S obtenue par secteur non linéaire à partir d'un modèle mathématique est une représentation polytopique convexe [8].

## 2.5. Description du système éolien

En générale, l'éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité [1] (figure 15). 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.

Malgré un principe général de fonctionnement très simple, la turbine éolienne est un système complexe faisant appel à des connaissances d'aérodynamique, de mécanique, de génie civil, d'électricité et d'automatique.

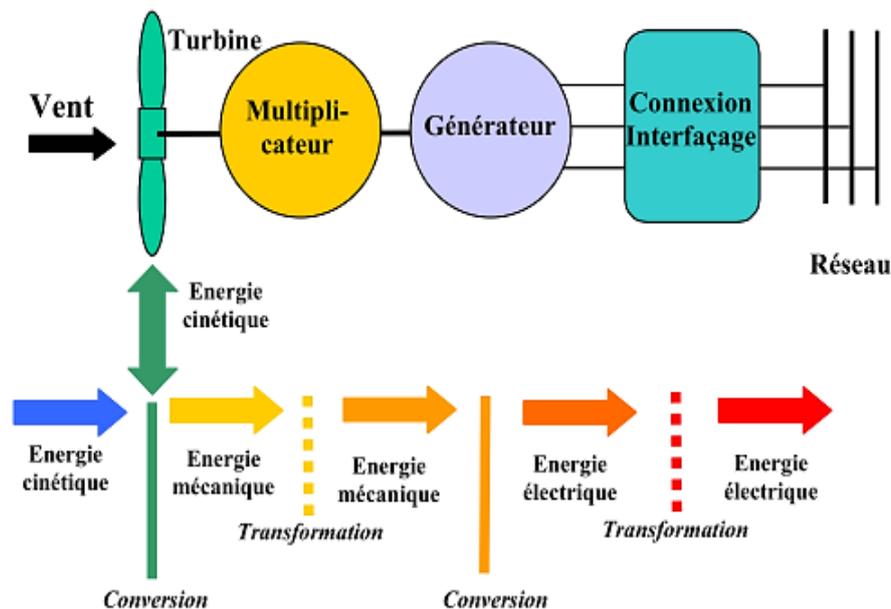


Figure 15. Conversion de l'énergie cinétique du vent [1].

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 horizontale à trois pales, de vitesse variable, avec un convertisseur complet et de puissance de 4.8 MW. Ce modèle "Benchmark" contient les sous-modèles : pales et système de calage (Blade & Pitch System), le train d'entraînement (Drive Train), le convertisseur et le générateur (Converter and Generator).

Chaque sous-modèle est présenté et combiné pour obtenir un modèle complet de l'éolienne, et réécrit sur la forme d'espace d'état.

Ces sous modèles sont montrés dans la figure 16, où les variables intervenant dans ces sous-systèmes sont définies dans [2], [3], [4].

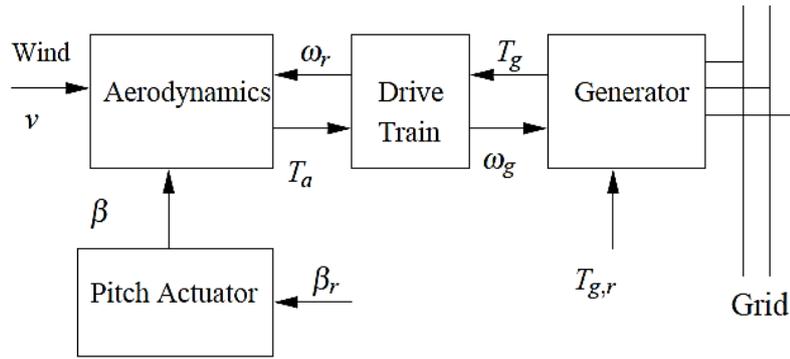


Figure 16. Schéma des sous-modèles de système éolien.

### 2.5.1. 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 :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (2.7)$$

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

- La puissance captée par l'aérogénérateur s'exprime par l'équation suivante [5] :

$$P_a = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 v^3 \quad (2.8)$$

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

$$\lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{v}$$

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple référence aérodynamique est donc exprimé par l'Eq. (2.9) et (2.10), où  $A$  est la surface balayée par la turbine [5].

$$T_a = K_{opt} \cdot \omega_r^2 \quad (2.9)$$

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda^3} \quad (2.10)$$

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

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (2.11)$$

Puis on obtient alors la relation de couple aérodynamique suivante :

$$T_a = \frac{1}{2} C_q(\lambda, \beta) \rho \pi R^3 v^2 \quad (2.12)$$

Le couple aérodynamique  $T_a$  est une fonction non linéaire de la vitesse du vent  $v$  et du coefficient de puissance  $C_p$ . Ce dernier est une fonction non linéaire aussi, qui dépend de rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de calage des pales  $\beta$ . Dans la zone à grande vitesse, la vitesse du rotor est maintenue à une vitesse nominale et  $T_a$  peut être approximée comme suit :

$$\Delta T_a(t) = \Delta T_{av}(z) \Delta v + \Delta T_{a\beta}(z) \Delta \beta + \Delta T_{a\omega_r}(z) \Delta \omega_r \quad (2.13)$$

Où  $\Delta v$ ,  $\Delta \beta$  et  $\Delta \omega_r$  sont les déviations du point de fonctionnement où  $T_{av}$ ,  $T_{a\beta}$  et  $T_{a\omega_r}$ , sont des dérivées partielles instantanées du couple aérodynamique défini comme suite [22] :

$$\begin{aligned} T_{av}(z) &= \left. \frac{\partial T_a}{\partial v} \right|_{(\bar{\omega}_r, \bar{v}, \bar{\beta})} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v \left[ 2C_p - \lambda \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \right]_{(\bar{\omega}_r, \bar{v}, \bar{\beta})} \\ T_{a\beta}(z) &= \left. \frac{\partial T_a}{\partial \beta} \right|_{(\bar{\omega}_r, \bar{v}, \bar{\beta})} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^2 \frac{\partial C_p}{\partial \beta} \Big|_{(\bar{\omega}_r, \bar{v}, \bar{\beta})} \\ T_{a\omega_r}(z) &= \left. \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} \right|_{(\bar{\omega}_r, \bar{v}, \bar{\beta})} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \Big|_{(\bar{\omega}_r, \bar{v}, \bar{\beta})} \end{aligned}$$

$\bar{\omega}_r$ ,  $\bar{v}$  et  $\bar{\beta}$  indiquent respectivement les valeurs de la vitesse de rotation, la vitesse du vent et de l'angle de calage autour du point de fonctionnement.

### 2.5.2. 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 (figure 17).

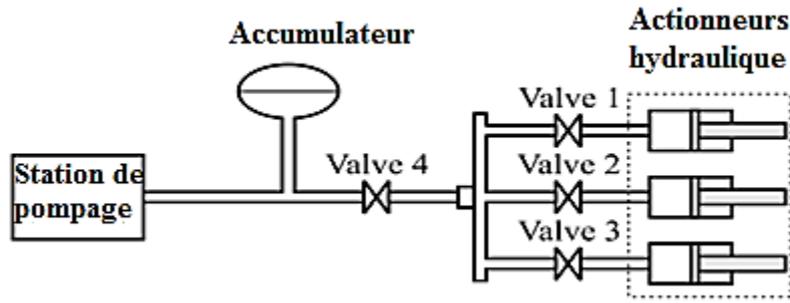


Figure 17. Le système hydraulique de l'angle du calage avec trois actionneurs, qui peuvent être contrôlés individuellement [6]

Cet actionneur hydraulique est modélisé comme une fonction de transfert de deuxième ordre :

$$\frac{\beta(s)}{\beta_r(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2.\zeta.\omega_n.s + \omega_n^2} \tag{2.14}$$

$\beta$  est l'angle de calage [°],  $\beta_r$  est l'angle de calage référence [°],  $\omega_n$  [rad / s] est la pulsation naturelle et  $\zeta$  [.] est le coefficient d'amortissement.

- Un schéma fonctionnel d'un modèle à angle de calage est montré dans la figure suivante :

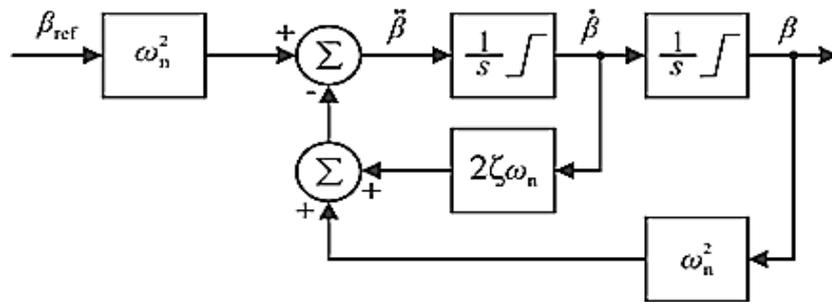


Figure 18. Le Schéma fonctionnel d'un modèle à angle de calage [6]

### 2.5.3. 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) [5], voir figure 19.

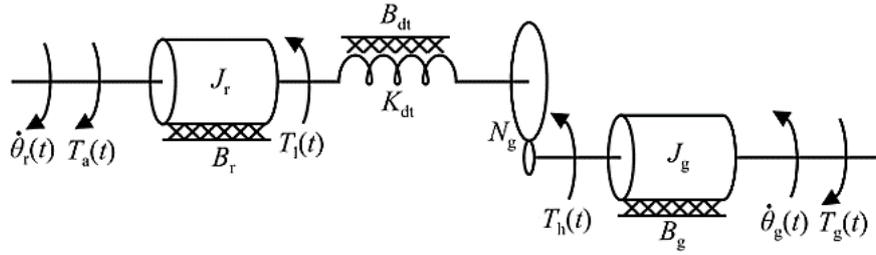


Figure 19. Le modèle de train d'entraînement est ces quatre composantes [6].

La représentation d'état de ce modèle est montrée par les équations ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r(t) \\ \dot{\omega}_g(t) \\ \dot{\theta}_\Delta(t) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \omega_r(t) \\ \omega_g(t) \\ \theta_\Delta(t) \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} T_a(t) \\ T_g(t) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{(B_{dt} + B_r)}{J_r} & \frac{B_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{K_{dt}}{J_r} \\ \frac{B_{dt}}{N_g J_g} & -\left(\frac{B_{dt}}{N_g^2} + B_g\right) & \frac{K_{dt}}{N_g J_g} \\ 1 & \frac{-1}{N_g} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Les paramètres du model et leurs unités sont montés dans le tableau suivant :

Tableau 2. Description des paramètres du multiplicateur

Paramètres		Unités
Le coefficient de torsion d'amortissement	$\beta_{dt}$	$[Nm / (rad / s)]$
La raideur de torsion	$K_{dt}$	$[Nm / rad]$
Le rapport de vitesse de multiplicateur	$N_g$	$[Nm / (rad / s)]$
La friction visqueuse de l'arbre rapide	$B_g$	$[Nm / (rad / s)]$
La friction visqueuse de l'arbre lente	$B_r$	$[Nm / (rad / s)]$
Le moment d'inertie de l'arbre rapide	$J_g$	$[kgm^2]$
Le moment d'inertie de l'arbre lente	$J_r$	$[kgm^2]$
Le couple de générateur	$T_g(t)$	$[Nm]$
Le couple aérodynamique	$T_a(t)$	$[Nm]$
La vitesse du rotor	$\omega_r$	$[rad / s]$
La vitesse du générateur	$\ \cdot\ $	$[rad / s]$
L'angle de torsion de multiplicateur	$\theta_{\Delta}(t)$	$[rad]$

#### 2.5.4. 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 [2,6], voir figure 20:

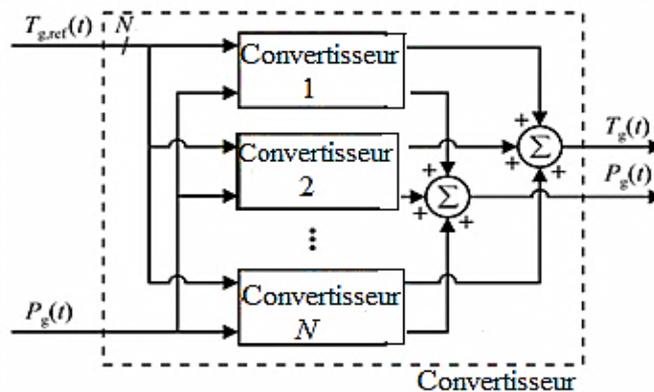


Figure 20. Le système de convertisseur : qui se compose de  $N$  des unités capables de charger le générateur par un certain moment de torsion précisé par le moment de torsion

$$\dot{T}_g(t) = \frac{1}{\tau_g} (T_{g,r} - T_g) \quad (2.18)$$

Où  $T_g(t)$   $T_{g,r}(t)$  sont respectivement le couple réel et celui désiré [Nm] et  $\tau_g$  la constante du temps [s].

- Un schéma fonctionnel d'un modèle de convertisseur simple est montré dans la figure suivante [6] :

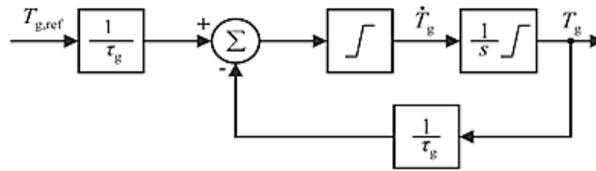


Figure 21. Schéma fonctionnel d'un convertisseur

La puissance produite par le générateur  $P_g(t)$  dépend de la vitesse de rotation de générateur et de la charge appliquée, comme décrit dans l'équation suivante :

$$P_g(t) = \omega_g(t)T_g(t) \tag{2.19}$$

Le tableau suivant représente les paramètres de modèle de référence de l'éolienne utilisé dans cette étude [7].

Tableau 3. Paramètres de modèle de référence de l'éolienne

Paramètres du modèle pales et pitch								
R	$\rho$	$\zeta$	$w_n$	$\zeta_2$	$w_{n2}$	$\zeta_3$	$w_{n3}$	
57.5 m	1.225 Kg/m <sup>3</sup>	0.6	11.11 rad/s	0.45	5.73 rad/s	0.9	3.42 rad/s	
Paramètres du modèle de transmission								
B <sub>dt</sub>	B <sub>r</sub>	B <sub>g</sub>	N <sub>g</sub>	K <sub>dt</sub>	$\eta_{dt}$	$\eta_{dt2}$	J <sub>g</sub>	J <sub>r</sub>
775.49 $\frac{N.m.s}{rad}$	7.11 $\frac{N.m.s}{rad}$	45.6 $\frac{N.m.s}{rad}$	95	2.7 10 <sup>9</sup> $\frac{N.m.s}{rad}$	0.97	0.92	390 Kg.m <sup>2</sup>	55.10 <sup>6</sup> Kg.m <sup>2</sup>

## 2.6. Représentation quasi-LPV d'un système VSWECS

En utilisant les équations (2.13) dans (2.15) et incluant les équations (2.14) et (2.18), le système non linéaire augmentée de VSWECS peut être formulée comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(z)x(t) + Bu(t) + B_v(z)v(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \tag{2.20}$$

Avec:  $x(t) = [\omega_r \ \omega_g \ \theta_\Delta \ \beta \ T_g \ \dot{\beta}]^T$ ,  $u(t) = [\beta_r \ T_{g,r}]^T$ ,  $z(t) = [v, \beta]^T$

$$y(t) = [\omega_r \ \omega_g \ \beta \ T_g]^T$$

Où :  $x(t)$  est le vecteur d'état,  $u(t)$  est le vecteur d'entrée de contrôle,  $y(t)$  est le vecteur de sortie et  $z$  représente les non-linéarités. Le système de commande agit à la fois sur le générateur afin d'appliquer le couple électromagnétique de référence  $T_{g,r}$  et sur le système d'actionneur de pale pour contrôler leur angle de calage des pales  $\beta$ .

$$A(z) = \begin{bmatrix} b_1 & \frac{B_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{K_{dt}}{J_r} & a_1 & 0 & 0 \\ \frac{B_{dt}}{N_g J_g} & \frac{-b_2}{J_g} & \frac{K_{dt}}{N_g J_g} & 0 & \frac{-1}{J_g} & 0 \\ 1 & \frac{-1}{N_g} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_n^2 & 0 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_g} \\ \omega_n^2 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_v(z) = \begin{bmatrix} a_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{J_r} \frac{\partial T_a}{\partial \beta} \\ a_2 = \frac{1}{J_r} \frac{\partial T_a}{\partial v} \\ b_1 = -\frac{(B_{dt} + B_r)}{J_r} \\ b_2 = \frac{B_{dt}}{N_g^2} + B_g \end{cases}$$

À partir du modèle d'espace d'état, il est clair que la matrice du système et la matrice de perturbation ne sont pas des matrices fixes et dépendent des variables d'état.

Afin d'obtenir la meilleure représentation possible de ce système fortement non linéaire, la section suivante présente une représentation quasi-LPV du système dans l'équation (2.20).

### 2.6.1. Représentation du Model Quasi-LPV Polytopique de VSWECS

Le comportement dynamique du système LPV est donné sous une forme polytopique qui permet de décrire le système comme une combinaison convexe de sous-systèmes définis par les sommets d'un polytope convexe. Ces sous-modèles sont ensuite combinés par des fonctions de pondération convexe.

Le modèle Quasi-LPV de système éolien est dérivé en fonction de deux variables de prémisses : l'angle de calage  $z_1(t) = \beta$  et la vitesse du vent  $z_2(t) = v$ . Ces variables de prémisses dans le système éolien sont supposées varier dans la plage de fonctionnement :

$$d_1 \leq z_1(t) \leq D_1 \text{ et } d_2 \leq z_2(t) \leq D_2 .$$

Cette étape consiste à appliquer la transformation polytopique convexe à chaque variable de prémisses  $z_i(t)$ , pour  $i = 1, 2$ . Nous réalisons ensuite pour chacune des variables de prémisses, une partition en deux zones.

Pour obtenir un modèle Quasi-LPV polytopique formé de quatre ensembles  $2^n$  ( $n$  est le nombre de variables de prémisses) du sous modèle LTI représentant les limites inférieure et supérieure, la transformation polytopique convexe utilisée est comme celle représentée dans la figure 22. Avec deux variables de prémisses  $z_1(t)$  et  $z_2(t)$ , nous obtenons quatre sous-modèles.

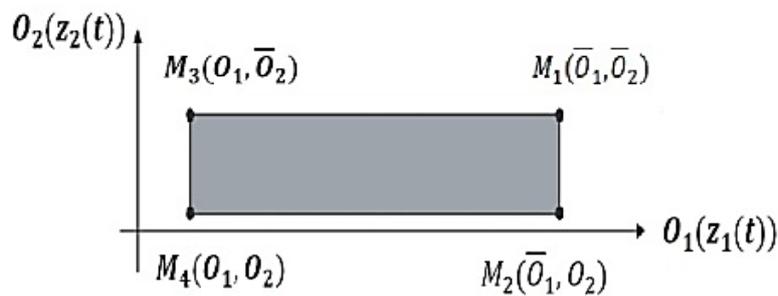


Figure 22. Zone de fonctionnement convexe du système

Pour  $z_1$  et  $z_2$  il existe quatre fonctions :

$$O_1 = \frac{z_1 - d_1}{D_1 - d_1}, \quad \bar{O}_1 = \frac{D_1 - z_1}{D_1 - d_1}, \quad O_2 = \frac{z_2 - d_2}{D_2 - d_2}, \quad \bar{O}_2 = \frac{D_2 - z_2}{D_2 - d_2}$$

Où :

$$O_1 + \bar{O}_1 = 1 \quad \text{et} \quad O_2 + \bar{O}_2 = 1$$

Aussi :

$$z_1(t) = O_1 D_1 + \bar{O}_1 d_1 \quad \text{et} \quad z_2(t) = O_2 D_2 + \bar{O}_2 d_2$$

Pour simplifier, notons  $O_j$  sous la forme générale :

$$O_j = \frac{-d_j}{D_j - d_j} + \left( \frac{1}{D_j - d_j} \right) z_j(t), \quad \bar{O}_j = 1 - O_j \quad (2.22)$$

Avec:

$$D_j \equiv \max_{z_j \in [l_{j\min}, l_{j\max}]} z_j(t)$$

$$d_j \equiv \min_{z_j \in [l_{j\min}, l_{j\max}]} z_j(t)$$

Pour  $j=1, 2$  noter que  $l_{j\min}$  et  $l_{j\max}$  sont les limites inférieure et supérieure de la variable  $z_j$ , respectivement.

Ensuite, pour obtenir le modèle Quasi-LPV polytopique, les fonctions de pondération de  $z_1(t)$  et  $z_2(t)$  doivent être choisies de telle sorte que :

$$A(z) = \sum_{i=1}^M h_i(z(t)) A_i, \quad B_v(z) = \sum_{i=1}^M h_i(z(t)) B_{vi}$$

Et, la fonction d'activation est sélectionnée comme suit :

$$h_1 = O_1 O_2, \quad h_2 = O_1 \bar{O}_2, \quad h_3 = \bar{O}_1 O_2, \quad h_4 = \bar{O}_1 \bar{O}_2$$

En considérant l'angle de calage et la vitesse du vent comme variables de prémisse, le modèle Quasi-LPV polytopique (2.20) est construit avec quatre modèles vertices linéaires dérivés pour représenter la dynamique du système à quatre points de fonctionnement (figure 23) :

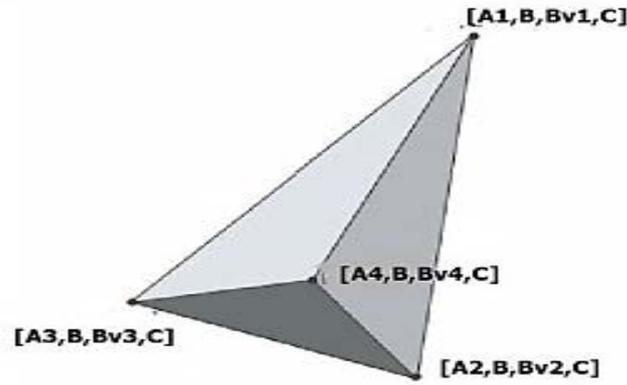


Figure 23. Espace polytopique avec quatre vertice

$$A_i = \begin{bmatrix} b_1 & \frac{B_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{K_{dt}}{J_r} & \mathcal{G}_i & 0 & 0 \\ \frac{B_{dt}}{N_g J_g} & \frac{-b_2}{J_g} & \frac{K_{dt}}{N_g J_g} & 0 & \frac{-1}{J_g} & 0 \\ 1 & \frac{-1}{N_g} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_n^2 & 0 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_g} \\ \omega_n^2 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{vi} = \begin{bmatrix} \mathcal{G}_{2i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Où : le paramètres  $\mathcal{G}_i$  pour  $i = 1, \dots, 4$  sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 4. Modèles Polytope de vertices

Modèles deVertice $i$	Fonction d'activation $h_i, h_{2i} \equiv h_i$	Paramètres du modèle $\mathcal{G}_i, \mathcal{G}_{2i} \equiv \mathcal{G}_i$	Sous Modèles LTI $A_i, B, B_{iv}, C$
1	$(O_1, O_2)$	$(D_1, D_2)$	$A_1, B, B_{1v}, C$
2	$(O_1, \bar{O}_2)$	$(D_1, d_2)$	$A_2, B, B_{2v}, C$
3	$(\bar{O}_1, O_2)$	$(d_1, D_2)$	$A_3, B, B_{3v}, C$
4	$(\bar{O}_1, \bar{O}_2)$	$(d_1, d_2)$	$A_4, B, B_{4v}, C$

## **2.7. Conclusion :**

La représentation Quasi-LPV des systèmes non linéaires constitue une alternative intéressante et un outil puissant dans la partie de modélisation. Cette approche est basée sur la décomposition du comportement dynamique du système en un nombre  $N$  de zones de fonctionnement, chaque zone étant caractérisée par un modèle local. La sortie de chaque sous-modèle participe à travers des fonctions d'activation à l'approximation du comportement global du système non linéaire de la turbine éolienne.

Le multi-modèle est considéré comme une approximation universelle car n'importe quel système non linéaire peut être approximé avec une précision imposée en augmentant le nombre de modèles locaux et en optimisant les fonctions d'activation.

Les outils d'analyse des systèmes linéaires peuvent être utilisés, au moins partiellement, sur les multi-modèles si les modèles locaux sont linéaires. Plusieurs structures permettent d'interconnecter les différents modèles locaux afin de générer la sortie globale du multi-modèle.

Dans ce chapitre, on a introduit un modèle Quasi-LPV polytopique décrivant la dynamique de la turbine éolienne et qui dépend de deux variables de décision : l'angle de calage et la vitesse du vent. Le comportement du système non linéaire est approximé à l'aide de quatre systèmes vertex linéaires pour représenter la dynamique du système en quatre points de fonctionnement à l'aide de la transformation polytopique de convexe.

## 2.8. Références :

- [1] Laverdure N. Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires. Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble. 2005.
- [2] Odgaard P.F, Stoustrup J, Kinnaert M. 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 2009, pp. 155-160.
- [3] Odgaard P.F, Stoustrup J. 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. 2012.
- [4] Odgaard P.F, Stoustrup J. 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. 2012.
- [5] Boumaiza A, Arbaoui F, Saïdi ML. Diagnostic des défauts à base d'observateur dans un système éolien. *Mediterranean Journal of Modeling and Simulation*. 2014; 1:045-055.
- [6] Esbensen T, Sloth C. Fault Diagnosis and Fault- Tolerant Control of Wind Turbines, Master's Thesis, Aalborg University.2009.
- [7] Laouti N. Diagnostic de défauts par les Machines à Vecteurs Supports : application à différents systèmes multivariables non linéaires. Université Claude Bernard - Lyon I, France. 2012.
- [8] Ben Hamouda L. Sur la synthèse de commandes prédictives tolérantes aux défauts à base de modèles T-S flous. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis et l'Université de Rouen.2015.
- [9] Ichalal D. Estimation et diagnostic de systèmes non linéaires d'écrits par un modèle de Takagi-Sugeno. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.2009
- [10] Jabri D. Contribution à la synthèse de lois de commande pour les systèmes de type Takagi-Sugeno et/ou hybrides interconnectés. Thèse de Doctorat de l'Université de Reims Champagne Ardenne. 2011.
- [11] Hamdi H. Approche Multi-Modèle pour l'Observation d'état et le Diagnostic des Systèmes Singuliers Non Linéaires. Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique de Tunis, 2012.
- [12] Rotondo D. Advances in Gain-Scheduling and Fault Tolerant Control. Thèse de Doctorat d'Université Politècnica de Catalunya, Barcelona. Spain.2018  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-62902-5>.

## **Chapitre 3 : Diagnostic des défauts de VSW ECS à base d'observateurs**

### 3.1. Introduction :

Deux grandes catégories de méthodes de diagnostic sont identifiables dans la littérature. La première catégorie est basée sur la redondance matérielle.

Ces méthodes sont considérées fiables mais encombrantes et coûteuses. La redondance matérielle consiste à utiliser plusieurs capteurs, processeurs et logiciels mesurant une même grandeur pour détecter et contrôler une variable. Le principe de vote est ensuite utilisé pour détecter l'élément en défaut, elle est très utilisée plus fréquemment dans les systèmes à haut risques et dans le cas où les conséquences de sécurité des humains et du procédé sont plus importantes que les contraintes économiques.

La seconde catégorie se base sur la redondance analytique. Elle est très intéressante à la fois sur le plan financier et technique puisqu'elle se base uniquement sur l'exploitation des relations existantes entre les différentes variables mesurées ou estimées. Après la collection des données, on essaie d'extraire les informations utiles à partir de ces données, en d'autres termes, de convertir ces données brutes en quelque chose de significative pour des objectifs bien précis. Le processus de détection de défauts proprement dit est donc composé essentiellement de deux phases : génération de résidus suivie par l'analyse de résidus.

### 3.2. Notion de diagnostic et surveillance d'un système

- Le diagnostic de défaut consiste à détecter, isoler et estimer le défaut. **La détection** du défaut détermine l'instant d'apparition d'un mauvais fonctionnement dans le système, tandis que **l'isolation** du défaut consiste à cerner (identifier) les causes ou les sources de défaut afin de dire s'il s'agit d'un défaut de type capteur, actionneur ou procédé, et **l'identification** du défaut donne une estimation de certaines caractéristiques du défaut telle que son amplitude [1].
- La surveillance et la supervision constituent un complément du diagnostic. La surveillance d'un système est une tâche continue et en temps réel pour déterminer l'état d'un système. Elle se fait à travers l'enregistrement des informations pouvant indiquer la survenue d'éventuelles anomalies dans le comportement du système. Quant à la supervision, elle consiste en la prise de décisions appropriées, lors de l'étape de surveillance du système, afin de maintenir le fonctionnement nominal du système malgré l'apparition de défauts. [2]

### 3.3. Définitions et terminologies

Selon le Comité Technique de l' « International Federation of Automatic Control (IFAC) Safe process » voici une terminologie unifiée concernant le domaine de diagnostic des défauts :

**Signatures** : Contiennent les informations jugées pertinentes par les experts des matériels pour la détection d'une défaillance. La complexité des signatures dépend de la nature des systèmes à diagnostiquer et varie en fonction de l'anomalie recherchée : défaillance ou dégradation

**Anomalie** : Particularité non conforme à la loi naturelle ou à la logique.

**Dégradation** : C'est une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.

**Défaut** : Écart non autorisé d'au moins une propriété caractéristique ou variable du système à partir du comportement acceptable / habituelle /standard du système.

**Perturbation** : Ecart entre le comportement d'un système physique et une référence dont l'origine n'est pas considéré comme une anomalie. De plus, perturbation et défauts sont de même nature, la différence entre les deux tient au caractère normal ou anormal du comportement des systèmes physiques.

**Panne** : L'interruption permanente d'une capacité du système pour effectuer une fonction requise dans des conditions de fonctionnement spécifiées.

**Dysfonctionnement** : L'irrégularité intermittente dans l'accomplissement de la fonction souhaitée du système.

**Détection de défauts** : Détermination de défauts présents dans un système et l'heure de détection.

**Isolation des défauts** : Détermination du type, de l'emplacement et du temps de détection d'un défaut. Cette étape suit l'étape de détection de défauts.

**Identification de défauts** : Détermination de la taille et variation dans le temps du comportement d'un défaut. Cette étape suit l'étape de l'isolation de défaut.

**Diagnostic des défauts** : Détermination du type, de la taille, de l'emplacement et du temps de détection d'un défaut. Cette étape suit la détection de défaut et inclut l'isolation et l'identification de défaut.

**Résidu** : L'indicateur de défaut, basé sur les écarts entre les mesures et un modèle basé sur des calculs d'équations.

**Symptôme** : Le changement d'une grandeur observable du comportement normal.

**Surveillance** : C'est une tâche continue en temps réel déterminant les conditions possibles d'un système physique, tout en reconnaissant et en indiquant des anomalies du comportement.

**Supervision** : La surveillance d'un système physique tout en prenant des actions appropriées pour maintenir le fonctionnement dans le cas de défauts.

**Sécurité** : Aptitude d'un système à ne pas causer de danger pour les personnes, le matériel ou pour l'environnement.

**Modèle quantitatif** : Utilise des relations statiques et dynamiques entre les variables du système et des paramètres afin de décrire le comportement d'un système en terme quantitatif mathématique.

**Modèle qualitatif** : Utilise des relations statiques et dynamiques entre les variables du système et des paramètres pour décrire le comportement du système en termes qualitatifs tels que les causalités ou les règles.

### 3.4. Différents modes de fonctionnement d'un système

Un système présente généralement plusieurs modes de fonctionnement. On peut observer des modes de plusieurs types parmi lesquels :

- **Mode de fonctionnement nominal** : C'est le mode où l'équipement ou le système industriel remplit sa mission dans les conditions de fonctionnement requises par le constructeur.
- **Mode de fonctionnement dégradé** : Correspond soit à l'accomplissement partiel de la mission, soit à l'accomplissement de celle-ci avec des performances moindres. En d'autres termes, il y a eu une dégradation dans le système mais pas de défaillance.
- **Mode de défaillance** : Correspond à des mauvais fonctionnements du système, c-à-d. qu'il y a eu défaillance soit après dégradation soit défaillance brusque.

### 3.5. Classification des défauts

Une modification suffisamment importante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant peut être la conséquence de défauts et un défaut est une cause probable d'erreur pour un fonctionnement donné. Le système défaillant est incapable d'accomplir correctement sa ou ses fonction(s) avec les performances requises et les défauts apparaissent dans différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation (voir figure 24), les différents types de défauts sont [3] :

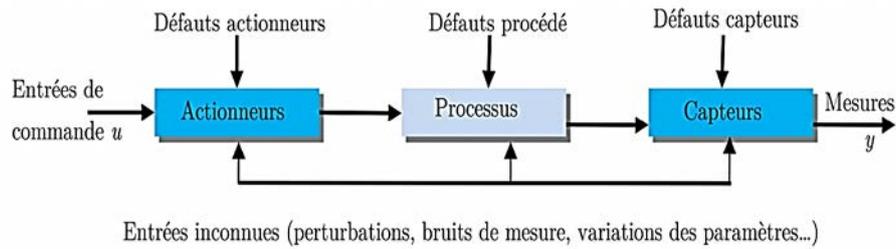


Figure 24. Différents types de défauts d'un système physique [4].

### 3.4.1. Défauts d'actionneur

L'actionneur est un élément de la partie opérative d'un système qui transforme les signaux de commande issus du contrôleur (micro-processeur, ou microcontrôleur) en mouvement (moteur), en chaleur (résistance électrique), ou en champ magnétique (électroaimant)... Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent la perte totale ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissant de manière similaire en régime normal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une dégradation de fonctionnement par rapport au fonctionnement sain [4].

Les défauts d'actionneurs les plus répandus sont : (a) l'oscillation, (b) le blocage, (c) la saturation et (d) la perte d'efficacité (figure 25). Les lignes en pointillées désignent les valeurs désirées de l'actionneur, cependant les lignes en trait continu représentent les valeurs actuelles.

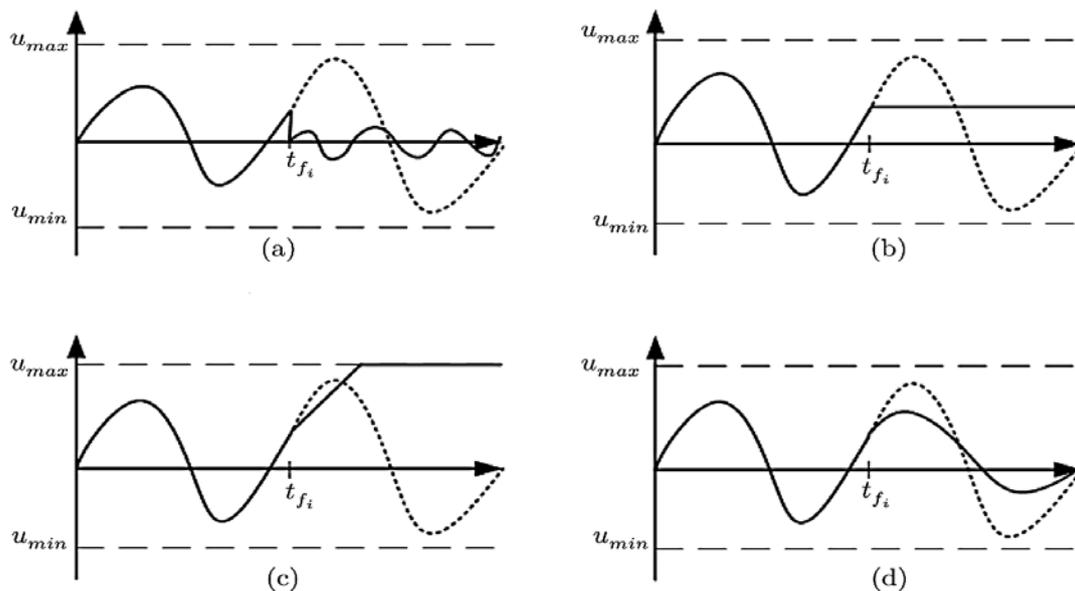


Figure 25. Représentation graphique des défauts actionneur les plus répandues [4].

### 3.4.2. Défauts procédés

Ce type de défaut provient du système lui-même, souvent les défauts n'appartiennent pas à un défaut capteur ou actionneur. Un défaut procédé résulte de la casse d'un composant du système et réduit les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit [3].

Ce type de défaut provoque un changement de la dynamique du système suite à un changement de ses paramètres. La représentation mathématique des défauts composants est souvent difficile à déterminer et demande des essais expérimentaux extensifs. En général, ils se traduisent par un changement dans l'équation d'états.

Les défauts peuvent être classés selon leurs évolutions temporelles : (a) abrupt, (b) Graduel, (c) valeurs aberrantes, voir la figure 26

- **Défaut abrupt** : Ce type de défaut apparaît à un instant ( $t$ ) et il est d'une amplitude constante non nulle. Ce type de défaut représente les pannes brutales.
- **Défaut graduel ou à dérive lente** : Ce type de défaut caractérise généralement des défauts d'usure contrairement aux autres défauts. L'amplitude de celui-ci ne reste pas constante ; elle augmente proportionnellement avec le temps. Ces défauts permanents sont plus difficiles à détecter à leur origine du fait de leur faible amplitude et de leur lente évolution.
- **Défauts valeurs aberrantes** : Les valeurs aberrantes sont des défauts dits fugitifs : elles affectent le système de manière instantanée. Leur cause est souvent due à un parasite, par exemple une perturbation électromagnétique. Elles se manifestent par un écart important et sporadique par rapport à la valeur nominale du signal.

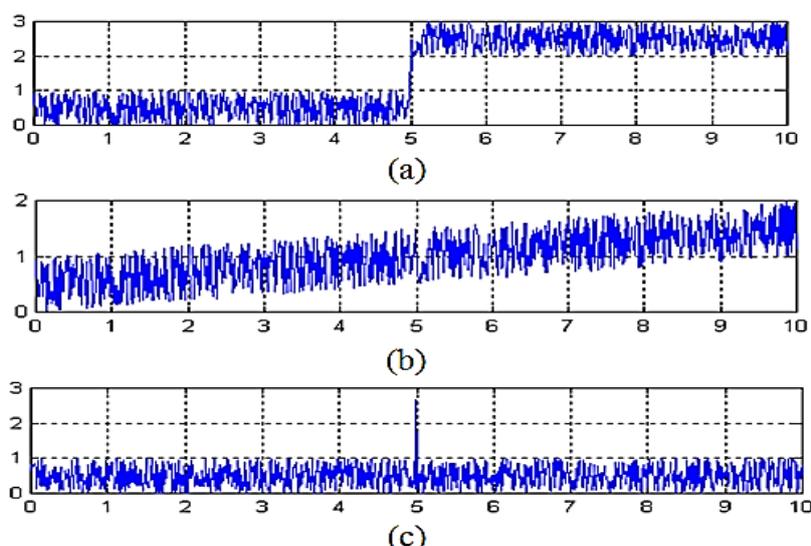


Figure 26. Évolution temporelle d'un défaut (a) Abrupt, (b) Dérive, (c) Valeurs aberrantes

### 3.4.3. Défauts capteurs

Les capteurs sont des instruments qui transforment une grandeur physique en une grandeur traitable par les calculateurs. Les capteurs sont essentiellement les interfaces de sortie d'un système avec l'environnement extérieur. Ils permettent de communiquer les informations concernant l'état et le comportement interne du processus. Ainsi, un défaut capteur caractérise une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer. Pour les systèmes en boucle fermée, les mesures issues de ces capteurs sont utilisées pour la génération du signal de commande. Par conséquent, la présence d'un défaut capteur donne un signal de commande inexacte et inefficace.

Les défauts capteurs les plus répandus sont : a) le biais, b) la dérive, c) la perte d'efficacité, d) le blocage et e) le défaut de calibrage. La figure 27 représente l'effet de ces défauts sur les mesures [4].

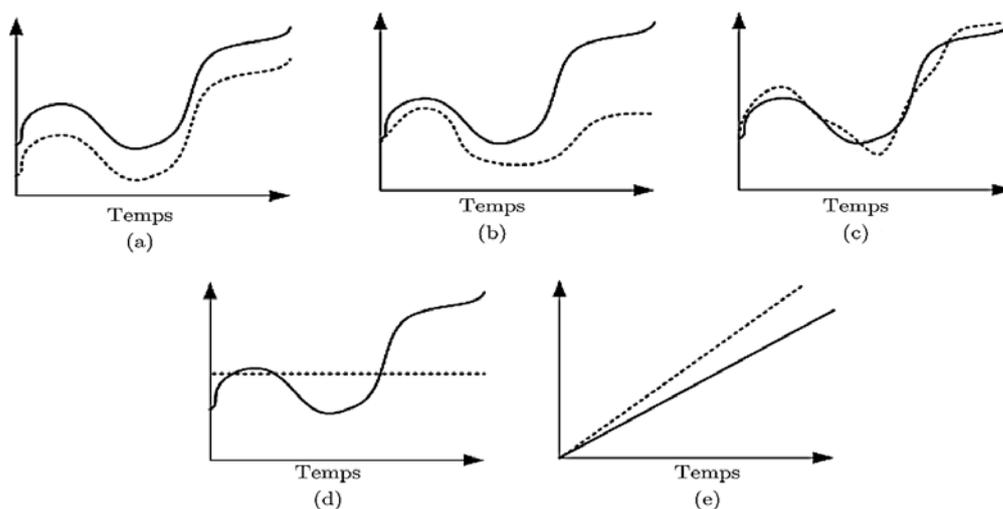


Figure 27. L'effet de différents types de défauts capteur sur les mesures.

Les lignes en pointillées désignent les valeurs mesurées de capteur, cependant les lignes en trait continu représentent les valeurs réelles. [4]

L'effet de ces défauts apparaît sur le modèle du système comme :

- **Défauts additifs** : Ces défauts n'affectent pas directement la dynamique de processus, ceci signifie que les caractéristiques du comportement de processus ne sont pas modifiées par le défaut. Les défauts capteurs et/ou actionneurs sont bien décrits comme défauts additifs, voir figure 28.

- **Défauts multiplicatifs ou non additifs** : ce sont des défauts qui provoquent des changements des paramètres du processus, ils affectent directement la dynamique du système.

Un composant du système agit comme un défaut multiplicatif, voir figure 29.

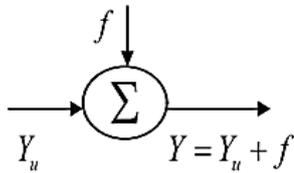


Figure 28. Défaut additif

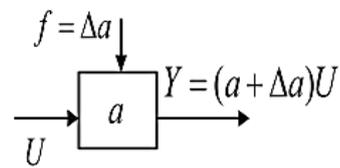


Figure 29. Défaut multiplicatif

### 3.6. Méthodologies de diagnostic avec/sans modèle

Les méthodes de surveillance telle qu'elles seront présentées dans ce chapitre sont illustrées sur la figure 30. Le domaine est très vaste et la figure montre la richesse des possibilités qui s'offrent au concepteur de systèmes de diagnostic. Les méthodologies de diagnostic se répartissent en deux grandes classes selon l'existence ou non d'un modèle formel ou mathématique du processus à surveiller.

- Dans le premier cas, les approches se fondent sur l'utilisation d'un modèle de comportement construit à partir de la physique du système ou d'une expertise humaine. Les méthodes qui en découlent sont appelées également méthodes internes de diagnostic. Elles impliquent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques qui devront obligatoirement être validés expérimentalement avant toute utilisation [5].
- Dans le second cas, les approches supposent que la connaissance disponible sur le système se limite à son observation passée et présente. Les méthodes qui en découlent sont appelées méthodes externes de diagnostic. Au sens strict, ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet (modèle de fonctionnement du processus). La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Dans cette catégorie, on trouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle. Au sens large, elle inclut la reconnaissance de forme, les systèmes experts et les réseaux de neurones artificiels [5].

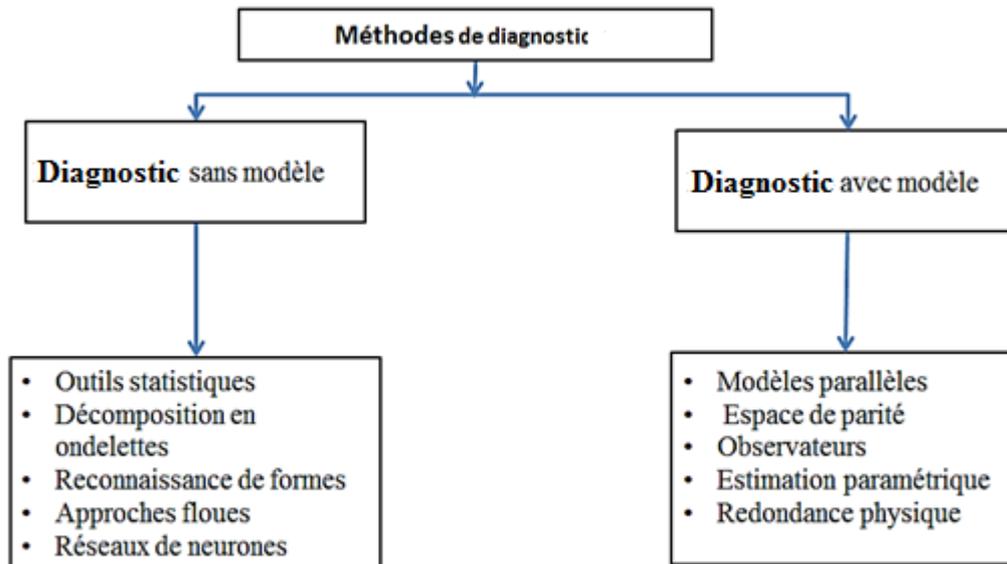


Figure 30. Classification des méthodologies de la surveillance.

Dans cette thèse, on ne s'intéresse qu'aux méthodes de surveillance des défaillances à base de modèle.

### 3.7. Concepts de diagnostic à base de Modèle

La disponibilité d'un modèle permettant de décrire le fonctionnement du processus à surveiller est la première étape dans la réalisation d'un diagnostic à base de modèle.

Les algorithmes FDI à base de modèle se composent de deux parties, la génération de résidu et l'évaluation. La figure 31 montre une structure générale des systèmes de surveillance sous forme de diagramme bloc.

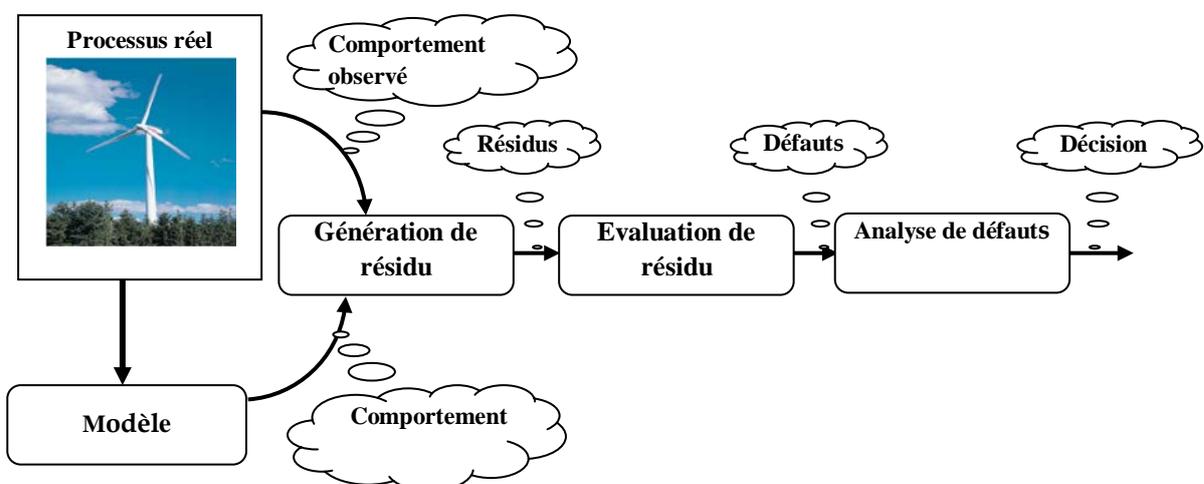


Figure 31. Principe de la surveillance à base de modèle.

### 3.7.1. Génération des résidus :

Cette étape consiste à générer un signal calculant la différence entre la sortie réelle et celle estimée. Le résidu converge vers zéro dans le cas d'un fonctionnement normal et diverge de zéro en cas de dysfonctionnement. La figure 32 illustre une structure générale d'un générateur de résidu.

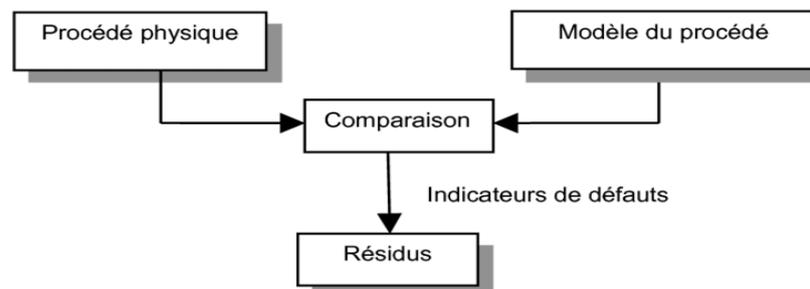


Figure 32. Une structure générale d'un générateur de résidu.

### 3.7.2. Évaluation des résidus :

Cette phase permet d'analyser les indicateurs de défaut générés et de définir un seuil (fixe, adaptatif, ou statistique) qui va décider de l'instant de changement d'état de fonctionnement du système. En effet, dans le cas réel, les bruits de mesure, les imprécisions de modélisation et les perturbations ne sont pas des grandeurs déterministes mais de nature aléatoire car ils vont introduire des variations imprévisibles sur le système. Cette étape est donc essentielle afin de diminuer les taux de fausse alarme ou de non détection.

Dans la suite, nous retiendrons les méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs et en particulier nous nous concentrons sur les méthodes à base d'observateurs.

## 3.8. Diagnostic des défauts à base d'observateurs

### 3.8.1. Observabilité des systèmes linéaires

Les critères d'observabilité d'un système linéaire sont décrits dans de nombreuses références. Nous présenterons uniquement ceux concernant les systèmes linéaires certains et réguliers. Considérons le système dynamique linéaire décrit par le modèle d'état suivant :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Les matrices  $A$ ,  $B$  et  $C$  ont des dimensions appropriées. La matrice d'observabilité du système (3.1) est définie par :

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix}$$

L'observabilité du système (3.1) est garantie si le rang de la matrice d'observabilité  $O$  est égal à  $n$  ; le système (3.1) est complètement observable si :

$$\text{rang} \begin{pmatrix} sI - A \\ C \end{pmatrix} = n$$

Pour tout  $s$  complexe. Si un système linéaire est complètement observable, il est globalement observable, c'est-à-dire que toutes les composantes du vecteur d'état du système sont observables, et donc peuvent être reconstruites par un observateur. Si le système est non linéaire, nous devons distinguer l'observabilité globale de l'observabilité locale [6].

### 3.8.2. Synthèse d'observateurs pour un système linéaire

Un observateur est un système dynamique qui reconstruit l'état du système à partir des entrées et des sorties mesurées. Les entrées d'un observateur sont donc les entrées et les sorties du système originel et la sortie d'un observateur est l'état estimé (figure 33).

Un observateur est utilisé dans le but d'estimer l'état ou une fonctionnelle linéaire de l'état (telle que la sortie d'un système). La différence entre la sortie mesurée et son estimée permet de générer des signaux appelés "résidus". L'évaluation de ces résidus, nous permet de s'informer sur l'état de fonctionnement des capteurs et actionneurs ainsi que sur l'état du système [6].

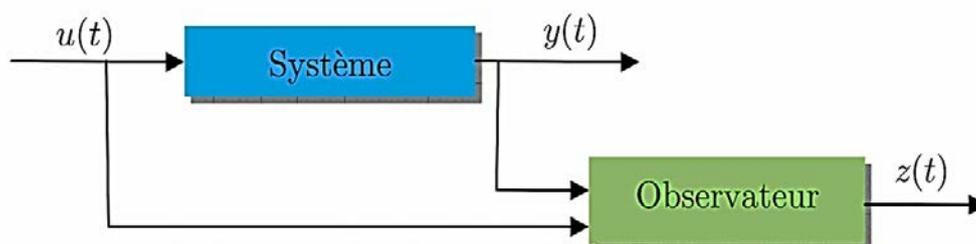


Figure 33. Schéma de principe d'un observateur [4]

D'après la figure 33, un reconstituteur d'état est un système ayant comme entrées, les entrées et les sorties du processus et dont la sortie est une estimation de l'état de ce processus. Nous cherchons donc à estimer l'état d'un système linéaire déterministe défini par (3.1).

Le principe de construction d'un observateur consiste à corriger l'erreur d'estimation entre la sortie réelle et la sortie reconstruite. Cet observateur est défini par :

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)) \\ &= (A - KC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ky(t) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t)\end{aligned}\quad (3.2)$$

Où  $K \in \mathfrak{R}^{n \times p}$  est le gain de l'observateur (3.2). Compte tenu des équations d'état et de sortie de l'observateur (3.2) et du système (3.1), nous en déduisons le diagramme structurel présenté à la figure 34, [6].

L'observateur est synthétisé de telle sorte que la différence entre l'état du système et son estimé tende vers zéro quand  $t$  tend vers  $\infty$ , donc si les valeurs propres de  $(A - KC)$  sont dans le demi-plan gauche du plan complexe. Le gain de l'observateur  $K$  peut être déterminé par la méthode de placement de pôles si le théorème suivant est vérifié :

**Théorème 1** : les valeurs propres de  $(A - KC)$  peuvent être fixées arbitrairement si et seulement si la paire  $(A, C)$  est observable.

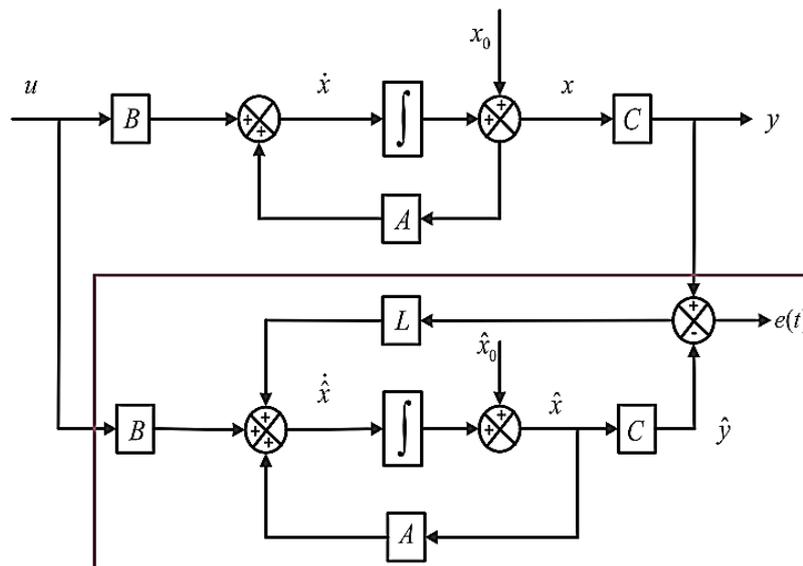


Figure 34. Diagramme structurel d'observateur de Luenberger

Si la paire  $(A, C)$  est observable, alors une grande liberté est laissée à l'utilisateur pour fixer la matrice  $K$ . De façon générale, elle est choisie telle que les valeurs propres de la matrice  $(A - KC)$  soient dans le demi-plan gauche du plan complexe et que la partie réelle des valeurs propres soit plus grande, en valeur absolue, que la partie réelle des valeurs propres de la

matrice d'état  $A$  ; dans ces conditions, la dynamique de l'erreur d'observation est donc plus rapide que celle du processus (système). Mais, il existe deux considérations contradictoires dont on doit tenir compte et qui interviennent dans le choix de la matrice  $K$  :

- les perturbations sur la paire  $(A, B)$  conduisent, si elles sont importantes, à choisir une valeur élevée de la matrice  $K$  afin de renforcer l'influence des mesures sur l'estimation d'état.
- le bruit entachant la mesure des grandeurs de sortie, amplifié par le gain, exige une petite valeur de  $K$  [6].

Le gain de l'observateur doit donc être choisi en effectuant un compromis pour satisfaire au mieux ces contraintes.

### 3.8.3. Banc d'observateurs :

Le banc d'observateurs consiste à utiliser plusieurs observateurs. Il existe deux structures : la structure DOS (Dedicated Observer Scheme) et la structure GOS (Generalized Observer Scheme).

La structure DOS est présentée dans la figure 35, où chaque sortie mesurée du système est utilisée par un seul observateur qui fournit une estimation de cette sortie. Un résidu par capteur est donc généré par la différence entre la mesure et l'estimation. Dans le cas d'un capteur défectueux, il y aura des différences entre les estimations fournies par l'observateur qui utilise la mesure de ce capteur et les mesures, les autres résidus ne seront pas affectés par ce défaut.

Si aucun capteur n'est défectueux, le résidu est idéalement nul, par contre, en pratique, il est non nul en raison des erreurs de modélisation et du bruit de mesure on dit qu'il est statiquement nul.

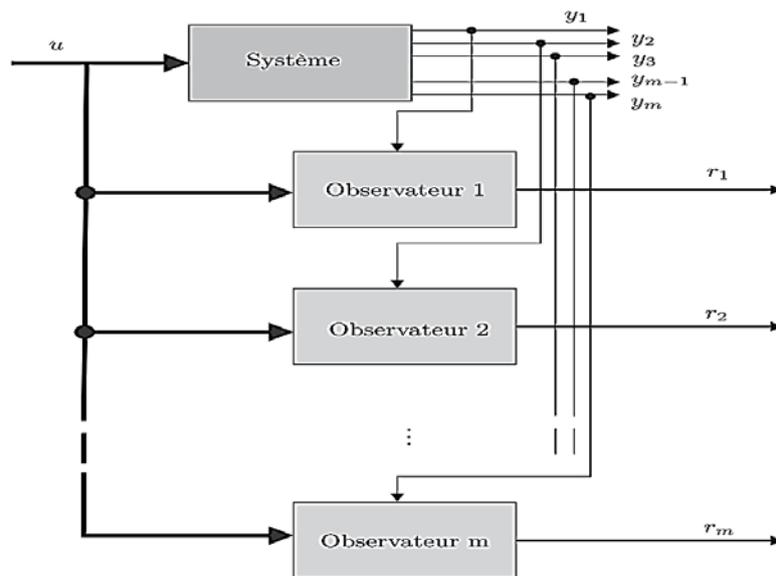


Figure 35. Observateur DOS pour la détection des défauts capteurs.

La structure de banc d'observateurs GOS (Generalized Observer Scheme) est présentée dans la figure 36. Il s'agit d'une modification du DOS de façon à obtenir plus de robustesse. Au lieu d'utiliser une seule mesure par observateur et d'estimer les autres, chaque observateur estime les sorties à partir des toutes les mesures sauf une. Dans le cas d'un capteur défectueux, tous les observateurs signalent une différence entre les estimations et les mesures, à l'exception de l'observateur qui n'est pas connecté au capteur défectueux.

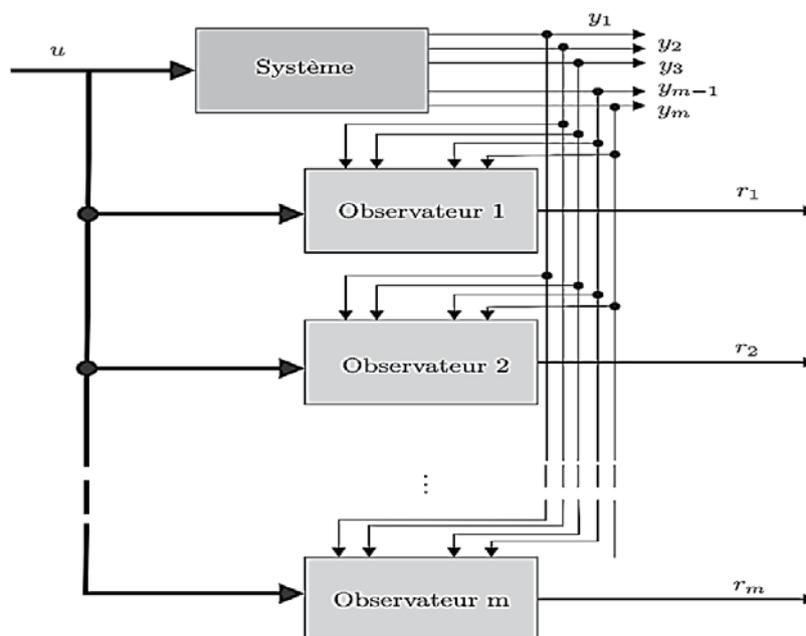


Figure 36. Observateur GOS pour la détection des défauts capteurs.

### 3.8.4. Génération des résidus

Afin d'isoler un défaut de l'un des capteurs de sortie, sous l'hypothèse que les entrées sont normales, un banc d'observateurs flous de Luenberger est utilisé. Leur nombre est égal au nombre des sorties  $p$  et chaque estimateur utilise toutes les sorties sauf une.

Dans ce cas, un défaut dans la  $i$ ème sortie affecte  $(p - 1)$  résidus de tous les observateurs utilisant la  $i$ ème sortie. Le tableau suivant montre la "signature des défauts" dans le cas d'un seul défaut dans chacun des capteurs de sortie. Les résidus affectés par des défauts sont marqués par "1" dans la cellule correspondante de ce tableau, mais la valeur "0" signifie que le défaut d'entrée ou de sortie n'affecte pas le résidu correspondant.

En revanche pour isoler un défaut sur l'entrée (capteurs d'entrée ou encore d'actionneurs), sous l'hypothèse que les capteurs de sortie ne sont pas en défaut, un banc d'observateurs flous à mode glissant est utilisé. Le nombre de ces observateurs est égal à au nombre d'entrées  $m$  [14].

Tableau 5. Signatures des défauts de capteurs

$r_i$	$u_1$	$u_2$	...	$u_m$	$y_1$	$y_2$	...	$y_p$
$r_{O_1}$	1	1	...	1	0	1	...	1
$r_{O_2}$	1	1	...	1	1	0	...	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$r_{O_p}$	1	1	...	1	1	1	...	0

### 3.9. Observateurs non linéaires

La reconstruction de l'état d'un système (et par extension la reconstruction de sa sortie) est également un problème classique de l'Automatique. Luenberger [7,8] a étudié un reconstruteur d'état, auquel son nom a été attribué. L'observateur de Luenberger n'est pas toujours suffisant pour la détection de défauts, car l'erreur d'estimation (de l'état ou de la sortie) engendrée par cet observateur pour un système incertain ou à entrées inconnues ne converge pas forcément vers la valeur nulle.

Pour remédier à ce problème, nous pouvons utiliser les observateurs à modes glissants.

Les observateurs non linéaires se distinguent selon deux approches. Nous avons les observateurs qui s'inspirent de l'approche linéaire, pour établir des modèles non linéaires et les observateurs se basant directement sur des principes de non linéarité comme les observateurs à modes glissants.

### 3.9.1. Observateur de Walcott et Žak

Le problème considéré par Walcott et Žak [9,10] est l'estimation d'état du système de sorte que l'erreur tende vers zéro d'une façon exponentielle malgré la présence des incertitudes considérées.

Dans cette partie, on suppose que :

$$f(x, u, t) = R\xi(x, t) \quad (3.3)$$

Où la fonction  $\xi : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^q$  est une fonction bornée et inconnue, telle que :

$$\|\xi(x(t), t)\| \leq \rho, \forall x(t) \in \mathbb{R}^n, t \geq 0 \quad (3.4)$$

On considère qu'il existe une matrice  $G \in \mathbb{R}^{n \times p}$  telle que la matrice  $A_0 = (A - GC)$  a des valeurs propres stables, une paire de matrices de Lyapunov  $(P, Q)$  symétriques et définies positives et une matrice  $F$  respectant la contrainte structurelle suivante :

$$\begin{cases} (A - GC)^T P + P(A - GC) = -Q \\ C^T F^T = PR \end{cases} \quad (3.5)$$

L'observateur proposé est de la forme :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G(C\hat{x}(t) - y(t)) + v(t) \quad (3.6)$$

$$v(t) = \begin{cases} -\rho \frac{P^{-1}C^T F^T FCe(t)}{\|FCe(t)\|} & \text{si } FCe(t) \neq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\text{Où } e(t) = \hat{x}(t) - x(t) \quad (3.8)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation d'état engendrée par cet observateur est régie par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{\hat{x}}(t) - \dot{x}(t) \\ &= A\hat{x}(t) + Bu(t) - G(C\hat{x}(t) - y(t)) + v(t) - (Ax(t) + Bu(t) + R\xi(x, t)) \\ &= (A - GC)e(t) + v(t) - R\xi(x, t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(e(t)) = e^T(t)Pe(t) \quad (3.10)$$

Sa dérivée le long de la trajectoire de l'erreur d'estimation s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t)) &= \dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t) \\ &= ((A - GC)e(t) + v(t) - R\xi(x, t))^T Pe(t) + e^T(t)P((A - GC)e(t) + v(t) - R\xi(x, t)) \\ &= -e^T(t)Qe(t) + 2e^T(t)Pv(t) - 2e^T(t)PR\xi(x, t) \\ &= -e^T(t)Qe(t) + 2e^T(t)Pv(t) - 2e^T(t)C^T F^T \xi(x, t) \end{aligned}$$

On distingue deux cas :

**Cas 1 :** Lorsque,  $FCe(t) \neq 0$  en remplaçant l'expression de  $v(t)$  par l'équation (3.7), la dérivée de la fonction de Lyapunov devient :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t)) &= -e^T(t)Qe(t) - 2e^T(t)\rho \frac{C^T F^T FCe(t)}{\|FCe(t)\|} - 2e^T(t)C^T F^T \xi(x, t) \\ &= -e^T(t)Qe(t) - 2\rho\|FCe(t)\| - 2e^T(t)C^T F^T \xi(x, t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

En utilisant le fait que la fonction inconnue  $\xi(x, t)$  est bornée par un scalaire positif  $\rho$ , la dérivée de la fonction de Lyapunov peut être majorée de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t)) &\leq -e^T(t)Qe(t) - 2\rho\|FCe(t)\| + 2\rho\|FCe(t)\| \\ &\leq -e^T(t)Qe(t) < 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

**Cas 2 :** Lorsque  $FCe(t) = 0$ , en remplaçant l'expression de  $v(t)$  par l'équation (3.7), la dérivée de la fonction de Lyapunov s'écrit :

$$\dot{V}(e(t)) = -e^T(t)Qe(t) < 0 \quad (3.13)$$

Dans les deux cas, la dérivée de la fonction de Lyapunov est négative ce qui montre que l'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro.

Pour garantir la convergence asymptotique de l'observateur, on doit vérifier que :

- la paire  $(A, C)$  est observable,
- il existe une paire de matrices de Lyapunov  $(P, Q)$  et une matrice  $F$  respectant les contraintes (3.5).

### 3.9.2. Observateur à mode glissant utilisant une forme canonique

L'inconvénient de l'observateur de Walcott et Žak [10] réside dans le calcul de la variable glissante, car dans le cas où la matrice  $F$  est orthogonale au vecteur  $Ce(t)$ , la convergence de l'observateur n'est pas garantie. Pour résoudre ce problème, Edwards et Spurgeon [11,12] ont élaboré un observateur, en utilisant la forme canonique du système, basé sur la structure de l'observateur de Walcott et Žak où le calcul de la variable glissante dépend de l'existence de quelques matrices appropriées et de l'erreur de sortie.

Pour cela, considérons de nouveau le système dynamique présenté au paragraphe précédent :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + R\xi(x, u, t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.14)$$

Où  $A_i \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ ,  $C \in \mathfrak{R}^{p \times n}$  et  $D \in \mathfrak{R}^{n \times q}$  où  $p \geq q$ . Suppose que les matrices  $A$ ,  $B$  et  $R$  sont de plein rang et la fonction  $\xi : \mathfrak{R}_+ \times \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^m \rightarrow \mathfrak{R}^q$  est une fonction bornée inconnue telle que :

$$\|\xi(x, u, t)\| \leq \rho \quad (3.15)$$

Avant de passer à l'estimation du vecteur d'état et de sortie du système (3.14), nous allons procéder à deux changements de coordonnées du vecteur d'état.

### 3.9.3. Conception d'un modèle d'observateur décentralisé à mode glissant basé sur les techniques FDI.

Un «système décentralisé» est davantage concerné par le fait de prendre la (les) mesure (s) de contrôle d'une fonction centrale pour contrôler les actions sur des sites décentralisés du système. Un système décentralisé n'a pas de noyau de contrôleur car il est généralement composé de nombreux sous-systèmes qui travaillent à l'unisson pour former une structure stable, cela signifie que l'accent de cette notion est que le système manque de décideurs ou de coordinateurs centralisés.

Cette section se concentre sur la conception d'observateurs décentralisés utilisant la théorie de l'observateur en mode glissant (SMO). L'observateur de Walcott et Žak et l'observateur d'Edwards et Spurgeon sont examinés. Pour obtenir une estimation décentralisée de l'état du système, un observateur de Walcott et Žak décentralisé basé sur une LMI est développé à partir de la théorie utilisée pour les systèmes simples ou centralisés. L'approche DSMO

choisie est une extension d'observateur de Walcott et Žak utilisant une nouvelle amélioration de la loi de contrôle dans laquelle les erreurs de sortie sont garanties d'être nulles lorsque les surfaces de glissement sont atteintes en présence d'incertitudes liées non comparées et d'interactions incertaines liées (résultant de la non-linéarité). La méthode SMO décentralisée développée dans cette section est appliquée à la fois à l'estimation des défauts d'actionneur et de capteur.

La conception d'observateur décentralisé à mode glissant DSMO (Decentralized Sliding Mode Observer) est basée sur un système non linéaire MIMO soumis à des défauts d'actionneur et à des défauts de capteur dans le modèle Quasi-LPV suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = \sum_{i=1}^M h_i(z)(A_i x + B u + B_{v_i} v + E_i f_a) \\ y = C x + f_s \end{cases} \quad (3.16)$$

Tel que:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M h_i(z) = 1 \\ 0 \leq h_i(z) \leq 1 \quad \forall i = \{1, \dots, M\} \end{cases} \quad (3.17)$$

Où  $x(t) \in \mathfrak{R}^n$  est le vecteur d'état,  $u(t) \in \mathfrak{R}^m$  est le vecteur d'entrée,  $f_a(t) \in \mathfrak{R}^l$  est un défaut d'actionneur,  $f_s(t) \in \mathfrak{R}^p$  est un défaut de capteur et  $y(t) \in \mathfrak{R}^p$  est le vecteur de sortie mesurable. Pour le  $i$ ème modèle local  $A_i \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  est la matrice d'état,  $B \in \mathfrak{R}^{n \times m}$  est la matrice des entrées,  $E_i \in \mathfrak{R}^{n \times l}$  désigne la distribution des fautes de plein rang et  $C \in \mathfrak{R}^{p \times n}$  est la matrice de sortie. Finalement,  $z$  représente le vecteur de prémisse formé par un sous-ensemble des variables d'état d'entrée et/ou de sortie pour définir les régions de validité des modèles locaux.

La reconstruction des variables d'état consiste à utiliser les informations fournies par les signaux d'entrée et de sortie. L'observateur proposé pour le modèle multiple (Eq. 2.23) est une combinaison linéaire d'observateurs locaux, chacun d'entre eux ayant la structure proposée par Walcott et Žak [13]. Dans ce contexte, nous considérons que les entrées  $f_a(t)$  sont bornées, telles que,  $\|f_a(t)\| \leq \eta$  où  $\eta$  est un scalaire et  $\|\cdot\|$  représente la norme euclidienne. On suppose également qu'il existe des matrices  $G_i \in \mathfrak{R}^{n \times p}$  telles que  $A_{0_i} = A_i - G_i C$  celles qui ont des

valeurs propres stables et qu'il existe des paires de matrices Lyapunov  $(P, Q_i)$  et d'autres matrices  $F_i \in \mathfrak{R}^{p \times n}$  respectant les contraintes structurelles suivantes :

$$\begin{cases} A_{0i}^T P + P A_{0i} = -Q \\ F_i C = R_i^T P, \quad \forall i \in 1, \dots, M \end{cases} \quad (3.18)$$

L'observateur proposé à la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \sum_{i=1}^M h_i(z) (A_i \hat{x} + B u + B_{v_i} v + E_i f_a + G_i e_y + R_i v_i) \\ y = C \hat{x} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$e_y = y - \hat{y} = C(x - \hat{x}) = C e \quad (3.20)$$

$e(t)$  Représente l'erreur d'estimation d'état, telle que :

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (3.21)$$

Les matrices  $G_i$  et les variables de contrôle  $v_i$  avec  $v_i(t) \in \mathfrak{R}^q$  doivent être déterminées pour assurer la convergence asymptotique de  $\hat{x}(t)$  vers  $x(t)$ . Les termes  $v_i(t)$  compensent les erreurs dues aux entrées inconnues. La dynamique de l'erreur d'estimation d'état est donnée comme suit :

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^M h_i(z) ((A_i - G_i C) e + B_{v_i} v + E_i f_a - R_i v_i) \quad (3.22)$$

**Théorème 2 :** L'erreur d'estimation d'état entre le modèle multiple (2.23) et l'observateur multiple d'état robuste (3.18) converge vers zéro, si  $v_i(t)$  sont données par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \text{Si } e_y(t) \neq 0, & \text{alors } v_i(t) = \eta \frac{F_i e_y}{\|F_i e_y\|} \\ \text{Si } e_y(t) = 0, & \text{alors } v_i(t) = 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

Et s'il existe une matrice symétrique définie positive  $P$  qui satisfait les inégalités suivantes :

$$(A_i - G_i C)^T P + P(A_i - G_i C) < 0 \quad i = \{1, \dots, M\} \quad (3.24)$$

**Preuve :** Afin de montrer la convergence asymptotique de cet observateur multiple, considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(e(t)) = e^T(t) P e(t) \quad (3.25)$$

Sa dérivée par rapport au temps, qui a été évaluée le long de la trajectoire du système en utilisant les équations (3.19) et (3.21), peut être exprimée comme suit :

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^M h_i(z) \left( e^T (\bar{A}_i^T P + P \bar{A}_i) e + 2e^T P R_i \bar{u} - 2e^T P R_i v_i \right) \quad (3.26)$$

Où :  $\bar{A} = A_i - G_i C$

En utilisant la seconde partie de la contrainte (3.17), la dérivée de la fonction Lyapunov devient :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^M h_i(z) \left( e^T (\bar{A}_i^T P + P \bar{A}_i) e + 2e^T C^T F_i^T \bar{u} - 2e^T C^T F_i^T v_i \right) \\ &= \sum_{i=1}^M h_i(z) \left( e^T (\bar{A}_i^T P + P \bar{A}_i) e + 2e_y^T F_i^T \bar{u} - 2e_y^T F_i^T v_i \right) \\ &\leq \sum_{i=1}^M h_i(z) \left( e^T (\bar{A}_i^T P + P \bar{A}_i) e + 2\eta \|F_i e_y\| - 2e_y^T F_i^T v_i \right) \end{aligned}$$

En utilisant la relation (3.22), nous obtenons :

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{i=1}^M h_i(z) \left( e^T (\bar{A}_i^T P + P \bar{A}_i) e + 2\eta \|F_i e_y\| - 2\eta e_y^T F_i^T \frac{F_i e_y}{\|F_i e_y\|} \right) \\ \dot{V} &\leq \sum_{i=1}^M h_i(z) \left( e^T (\bar{A}_i^T P + P \bar{A}_i) e \right) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Ensuite, l'erreur d'estimation d'état de l'observateur multiple robuste (3.18) converge vers zéro si la relation (3.23) est valide.

#### 3.9.4. Reconstruction de défaut

Dans les simulations, le terme de commutation discontinu (3.23) est remplacé par

l'approximation continue  $v_{eq} = \eta \frac{F_i e_y}{\|F_i e_y\| + \delta}$ , où  $\delta$  est une petite constante positive et  $v_{eq}$  est le

signal d'injection de sortie équivalent décrivant le comportement moyen du terme discontinu

et l'effort nécessaire pour maintenir la mouvement sur la surface de glissement dans (3.23). Les défauts additifs de l'actionneur ( $f_a$ ) peuvent être reconstruits en utilisant la relation :

$$\hat{f}_a = \left( \sum_{i=1}^N h_i(z) E \right)^+ v_{eq}.$$

Il existe essentiellement deux types de défauts d'actionneur : défauts d'entrée, où le vecteur d'entrée  $u$  agissant sur un système  $\dot{x} = Ax + Bu$  est modifié, et défauts de paramètre, où la dynamique d'un actionneur particulier est modifiée comme par exemple le délai constante de temps dans l'équation de la dynamique de pitch.

Dans ce travail, les défauts d'actionneur d'entrée sont pris en compte, en particulier les défauts additifs ( $\tilde{u} = u + f_a$ ) et les défauts de gain ( $\tilde{u} = \alpha u$ ). Ce dernier peut être calculé en les retraçant jusqu'à la structure de défauts additive. Par exemple, un défaut de l'actionneur de gain  $\alpha$ , lorsque le signal de l'actionneur défectueux est donné par  $\tilde{u} = \alpha u = u + f_a$ , peut être calculé à partir du signal de défaut additif reconstruit  $\hat{f}_a$  comme  $\hat{\alpha} = \frac{u + \hat{f}_a}{u}$ , [12].

### 3.10. Conclusion :

Les systèmes industriels sont de plus en plus complexes. La fiabilité, la disponibilité et la sûreté de fonctionnement sont devenues très importantes.

Les différents types de défauts (capteurs, actionneurs ou composants) peuvent dégrader les performances générales du système éolien et avoir des conséquences sérieuses sur la sécurité. Ainsi, il devient important de détecter rapidement et avec précision toute occurrence du défaut et identifier sa nature. Alors, la conception de la partie diagnostic des défauts (FDI) devient un complément nécessaire aux algorithmes de commande et de surveillance dont le but est d'augmenter la performance du système, de garantir la qualité de production, et de diminuer les coûts de fabrication ainsi que l'amélioration de la sécurité de l'installation.

L'utilisation des méthodes de diagnostic à base de modèle est réalisée en deux étapes. La première étape consiste à générer un ensemble de résidus qui expriment la différence entre l'information produite par le système et celle délivrée par son modèle. Le résidu caractérise les modes de fonctionnement du système, il converge vers zéro en mode normal et diverge de zéro dans le cas contraire. La deuxième étape est la décision basée sur l'évaluation des résidus.

Selon que l'on veut faire de la commande et/ou du diagnostic, on peut effectuer la reconstruction d'état en s'appuyant sur les observateurs. Ces derniers qui sont étudiés dans ce chapitre, sont construits pour les systèmes représentés par une structure multi-modèles. Souvent connus sous le nom d'observateurs à mode glissant, le DSMO décrit un développement important de l'estimation des défauts en mode glissant qui ne souffre pas du problème de transformations de l'approche d'Edwards et Spurgeon, mais utilise également l'extension du SMO de Walcott et Žak. En fait, l'approche pour la SMO décentralisée est appliquée à la reconstruction d'erreur à la fois pour les erreurs d'actionneur et de capteur. L'analyse de la convergence de l'erreur d'estimation d'état s'effectue généralement à l'aide de la seconde méthode de Lyapunov. Des conditions de convergence de l'erreur d'estimation d'état sont alors établies sous la forme d'un ensemble d'inégalités matricielles LMIs (Linear Matrix Inequalities) et sont résolues à l'aide d'outils numériques.

### 3.11. Références :

- [1] Laouti N. Diagnostic de défauts par les Machines à Vecteurs Supports: application à différents systèmes multivariables non linéaires. Université Claude Bernard - Lyon I.2012.
- [2] Mahamoud Mohamed A. Observation et Diagnostic de Processus Industriels à Modèle Non Linéaire Applications aux Machines Electriques. Thèse de Doctorat de l'École Centrale De Nantes.2010.
- [3] Ramahaleomiarantsoa F J. Diagnostic des systèmes à énergies renouvelables de type éolien. Thèse de Doctorat de l'Université Pascal Paoli.2013.
- [4] Methnani S. Diagnostic, reconstruction et identification des défauts capteurs et actionneurs : application aux stations d'épurations des eaux usées. Thèse de Doctorat de L'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax.2012.
- [5] Kechida S. Synthèse des générateurs de résidus robustes pour la détection des défauts. Thèse de Doctorat de l'université Badji Mokhtar Annaba.2007.
- [6] Akhenak A. Conception d'observateurs non linéaires par approche multi modèles : application au diagnostic. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.2004.
- [7] Luenberger D.G. Determining the state of the linear system with observers of low dynamic order. Ph.D. dissertation, Department of Elec. Eng., Stanford University, California. 1963.
- [8] Luenberger D. G. Observing the state of a linear system, IEEE Trans.Mil.Electron.ME-8, pp. 74, 1964.
- [9] Walcott B.L, Corless M.J. et Žak S.H. Observation of dynamical systems in the presence of bounded nonlinearities/uncertainties. IEEE Conference on Decision and Control. pp. 961-966. 1986.
- [10] Walcott B.L, Žak S.H. Combined observer-controller synthesis for uncertain dynamical systems with applications, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 18, pp. 88-104, 1988.
- [11] Edwards C et Spurgeon S.K. On the development of discontinuous observers, International Journal of Control, Vol. 25, pp. 1211-1229, 1994.
- [12] Edwards C., Spurgeon S.K. et Patton R.J. Sliding mode observers for fault detection and isolation, Automatica, Vol. 36 (4), pp. 541-553, 2000.
- [13] Walcott B.L, Žak S.H. State observation of nonlinear uncertain dynamical systems. IEEE Trans. Automat. Control 32: 166-170. 1987.  
<https://doi.org/10.1109/TAC.1987.1104530>
- [14] Neçaibia A. Conception d'Observateurs Robustes pour le Diagnostic des Processus Énergétiques. Université Badji Mokhtar Annaba.2009.

## **Chapitre 4 : Applications et Résultats**

## 4.1. Introduction :

Le but de cette section est d'appliquer des méthodes permettant le diagnostic de défauts de capteurs et d'actionneurs dans le système VSWECS par le biais de deux stratégies utilisant des observateurs linéaires et non linéaires, où la reconstruction des défauts est envisageable dans le dernier type.

Dans la première méthode, la détection de défaut par banc d'observateurs type GOS est accomplie par le biais d'une vérification de mesures de capteurs. Le calcul de l'erreur d'estimation de sortie entre un observateur et la mesure nous permet d'obtenir des signaux des résidus. Ces résidus générés reflètent les défauts qui agissent sur le système (2.23). Un signal de résidu idéal devrait converger vers zéro dans le cas sans défaut et diverger de zéro en cas de dysfonctionnement. Une fois qu'un défaut ait été détecté, il doit être estimé. L'estimation du défaut précisera le type de défaut, sa durée, son amplitude et éventuellement son évolution probable.

En ce qui concerne la deuxième stratégie, on utilise un observateur décentralisé à mode glissant (DSMO) qui est une extension de l'observateur de Walcott et Žak développée par d'Edwards et Spurgeon comme c'est indiqué en paragraphe 3.9.3. La détection, la localisation ainsi que la reconstruction des défauts capteurs et actionneurs sont envisagées.

Les systèmes de générateurs et d'angle de calage « *pitch* » peuvent tomber en panne, et le défaut du générateur peut provoquer un offset. Les défauts d'actionneur pitch considérés sont : chute de pression dans la pompe, fuite hydraulique, haute teneur en air dans l'huile hydraulique, blocage de la vanne et blocage de la pompe.

Dans cette application, la faute examinée est haute teneur en air dans l'huile. L'air est beaucoup plus compressible que l'huile ; il provoque un dépassement de la réponse transitoire en raison de l'élasticité accrue de l'huile hydraulique comme montré dans la figure 37.

La teneur en air normale dans l'huile hydraulique est de 7%, alors que la teneur en air élevée dans l'huile correspond à 15%. Par conséquent, le défaut est modélisé en modifiant la dynamique les paramètres d'actionneur de pitch  $\omega_n$  et  $\xi$ . Les paramètres pour l'actionneur de pitch défectueux sont indiqués dans le tableau 6 [1].

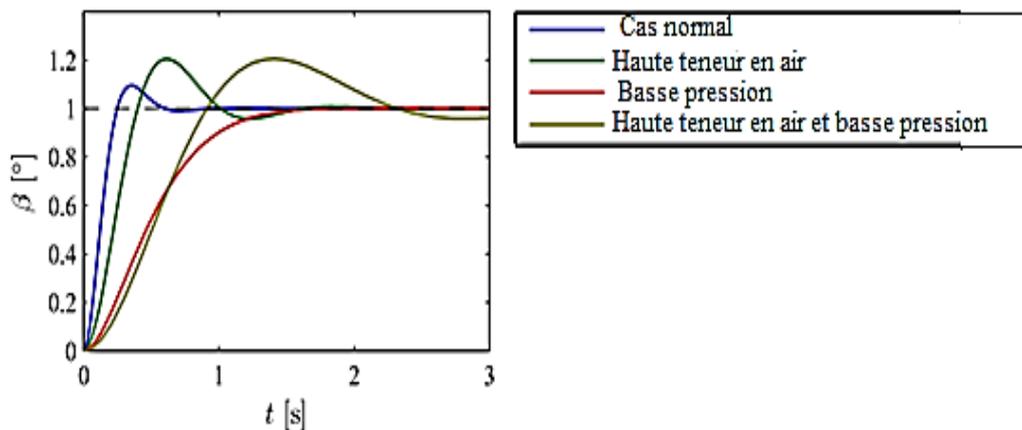


Figure 37. Réponse à un échelon du modèle pitch hydraulique dans différentes conditions.

Tableau 6. Paramètres du système pitch sous différentes conditions.

Défauts	$\omega_n$ (rad / s)	$\xi$
Sans défaut	11.11	0.6
Haute teneur en air dans l'huile	5.73	0.45
Usure de la pompe	7.27	0.75
Fuite hydraulique	3.42	0.9

Les tests de simulation utilisent le système éolien **benchmark** proposé par **kk-electronic** [2], [3]. Il s'agit du modèle d'une éolienne à vitesse variable à axe horizontal et à trois pales avec un convertisseur complet.

#### 4.2. Détection des défauts de capteurs et d'actionneurs dans le système de calage à base de banc d'observateurs GOS :

Dans le but d'identifier les défauts possibles dans une éolienne et de déterminer leurs effets sur le comportement du système, des défauts capteurs pouvant surgir dans une éolienne sont choisis de manière à couvrir les différents types. De plus, la redondance dans le système (redondance matérielle) peut être effectuée en comparant les signaux d'information et l'information redondante disponible fournie par le matériel approprié, cette redondance est identifiée pour déterminer la détection des défauts.

##### 4.2.1. Description et modélisation du système

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  $\beta_{i,m2}$ ).

#### 4.2.1.1 Détection de défaut

La détection de défaut peut être accomplie par une vérification simple entre les deux mesures de capteur  $\left( \left| \beta_{i,m1} - \beta_{i,m2} \right| \right)$  [4,5]. Après la détection de défaut, et afin de déterminer quel capteur est défectueux, une étape d'isolation de défaut (par observateur) est nécessaire.

#### 4.2.1.2 Localisation de défaut

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 :

$$\begin{aligned} \dot{x}_{pb} &= A_{pb} x_{pb} + B_{pb} (\beta_r + \beta_f) \\ y_{pb} &= C_{pb} x_{pb} \end{aligned} \quad (4.1)$$

D'après [4,5] le vecteur d'état  $x_{pb} = [\dot{\beta}_i \quad \beta_i]^T$  contient la vitesse angulaire de calage  $\dot{\beta}_i$  et la position  $\beta_i$  ( $i=1, 2, 3$ ),  $y_{pb}$  est la mesure d'angle de calage,  $\beta_r$  la référence de position,  $\beta_f$  est l'erreur de position causée par le défaut défini comme [4] :

$$\beta_f = \beta_i - \frac{1}{2} (\beta_{i,m1} + \beta_{i,m2}) \quad (4.2)$$

Donc

$$\dot{x}_{pb} = A_{pb} x_{pb} + B_{pb} \beta_r + B_{pb} \left[ \beta_i - \frac{1}{2} (\beta_{i,m1} + \beta_{i,m2}) \right] \quad (4.3)$$

A partir de scénario 1 on a :

$$\beta_{i,m1} = \beta_i = C_{pb} x_{pb}$$

Le système dynamique d'Eq. (4.1) sous le scénario 1 devient :

$$\begin{aligned}\dot{x}_{pb} &= (A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb})x_{pb} + B_{pb}(\beta_r - 0.5\beta_{i,m2}) \\ \beta_{i,m1} &= C_{pb}x_{pb}\end{aligned}\quad (4.4)$$

Par analogie, sous le scenario 2 le système devient :

$$\begin{aligned}\beta_{i,m2} &= \beta_i = C_{pb}x_{pb} \\ \dot{x}_{pb} &= (A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb})x_{pb} + B_{pb}(\beta_r - 0.5\beta_{i,m1}) \\ \beta_{i,m2} &= C_{pb}x_{pb}\end{aligned}\quad (4.5)$$

D'après les systèmes d'équations (4.4) et (4.5) les deux observateurs, OBS1 et OBS2, sont décrits respectivement par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{pb}^1 &= (A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb} - L_{pb}C_{pb})\hat{x}_{pb}^1 + B_{pb}(\beta_r - 0.5\beta_{i,m2}) + L_{pb}(\beta_{i,m1}) \\ \hat{\beta}_{i,m1} &= C_{pb}\hat{x}_{pb}^1\end{aligned}\quad (4.6)$$

Et

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{pb}^2 &= (A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb} - L_{pb}C_{pb})\hat{x}_{pb}^2 + B_{pb}(\beta_r - 0.5\beta_{i,m1}) + L_{pb}(\beta_{i,m2}) \\ \hat{\beta}_{i,m2} &= C_{pb}\hat{x}_{pb}^2\end{aligned}\quad (4.7)$$

Où  $\hat{\beta}_{i,m1}$  et  $\hat{\beta}_{i,m2}$  sont les sorties estimées de  $\beta_{i,m1}$  et  $\beta_{i,m2}$  provenant des deux observateurs et

$L_{pb}$ : est la matrice gain de l'observateur choisie pour assurer la stabilité de la matrice

$$A_{pb} + 0.5B_{pb}C_{pb} - L_{pb}C_{pb} \cdot$$

#### 4.2.1.3 Identification du défaut

On calculant l'erreur d'estimation de sortie entre l'observateur et la mesure, nous obtenons donc deux signaux de résidu :

$$\tilde{\beta}_{i,m1} = \beta_{i,m1} - \hat{\beta}_{i,m1}\quad (4.8)$$

$$\tilde{\beta}_{i,m2} = \beta_{i,m2} - \hat{\beta}_{i,m2}\quad (4.9)$$

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  $i$ ème observateur est piloté par toutes les sorties (entrées) sauf la  $i$ ème et toutes les entrées (sorties).

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

#### 4.2.2. Discussions 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  $\beta_1, \beta_3$ .

##### ➤ *Système de calage1 (défaut valeur fixe dans $\beta_{1,m2}$ )*

Pour le système de calage  $\beta_1$ , on a introduit un défaut de capteur de type valeur fixe dans la deuxième mesure de capteur ( $\beta_{1,m2} = 23^\circ$ ) entre les instants 3500 s et 4100 s.

La figure 38 représente les deux mesures  $\beta_{1,m1}$  (sans défaut) et  $\beta_{1,m2}$  (avec défaut) obtenus par capteur 1 et capteur 2,

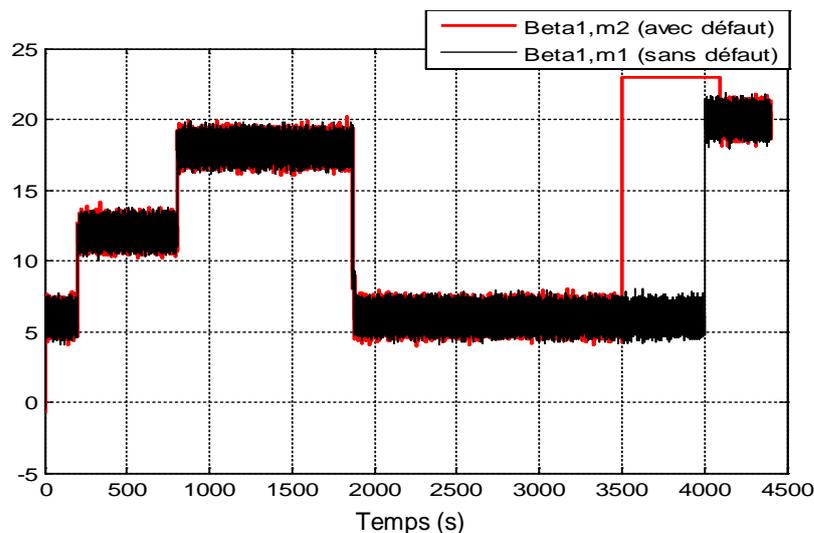


Figure 38. Evaluation des mesures (en noir sans défaut) et (en rouge avec défaut) concernant la pale1

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 réagit à la présence de cette anomalie. Le défaut est détectable dans l'intervalle de temps mentionné précédemment et le temps de détection est d'environ 0,02s.

La figure 39 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.

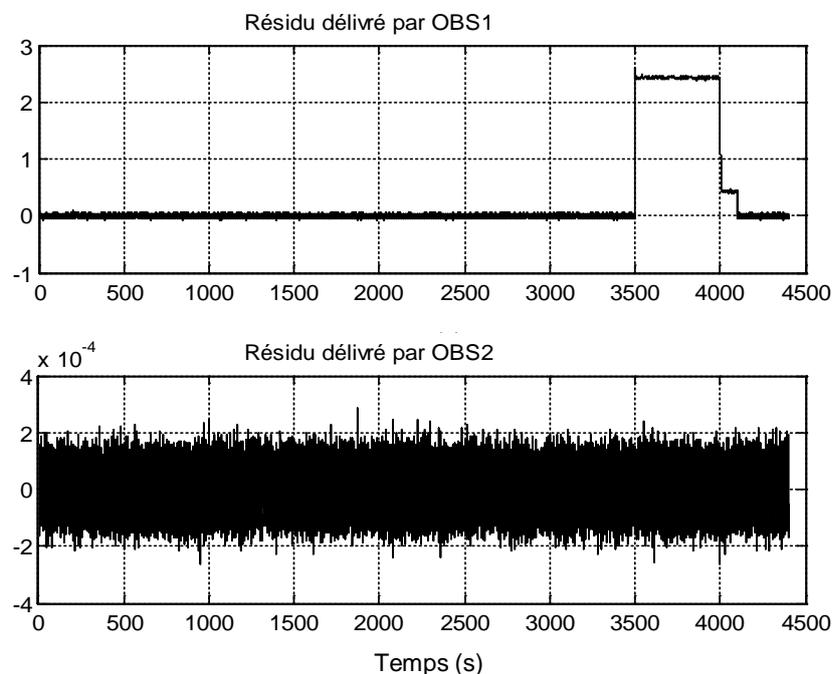


Figure 39. Reconstruction de défaut de capteur dans le système de calage 1

➤ *Système de calage 3*

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

- Défaut de capteur de type gain dans la première mesure ( $\beta_{3,m1} = 0.5 \times \beta_{3,m1}$ ) entre 1200 et 1600 s ;
- Défaut d'actionneur causé par une fuite hydraulique  $\omega_n=3.42$  et  $\xi=0.9$  qui se développe progressivement dans l'intervalle 3000-3200 s ;

La figure 40 représente les deux mesures  $\beta_{3,m1}$  et  $\beta_{3,m2}$  obtenues respectivement par le capteur 1 et le capteur 2 avec l'évaluation des défauts. Elle montre clairement les changements d'un régime normal à un régime défaillant. Ceci permet de détecter les défauts de capteur et d'actionneur, avec un temps de détection respectivement d'environ 0.02s et 0.6s.

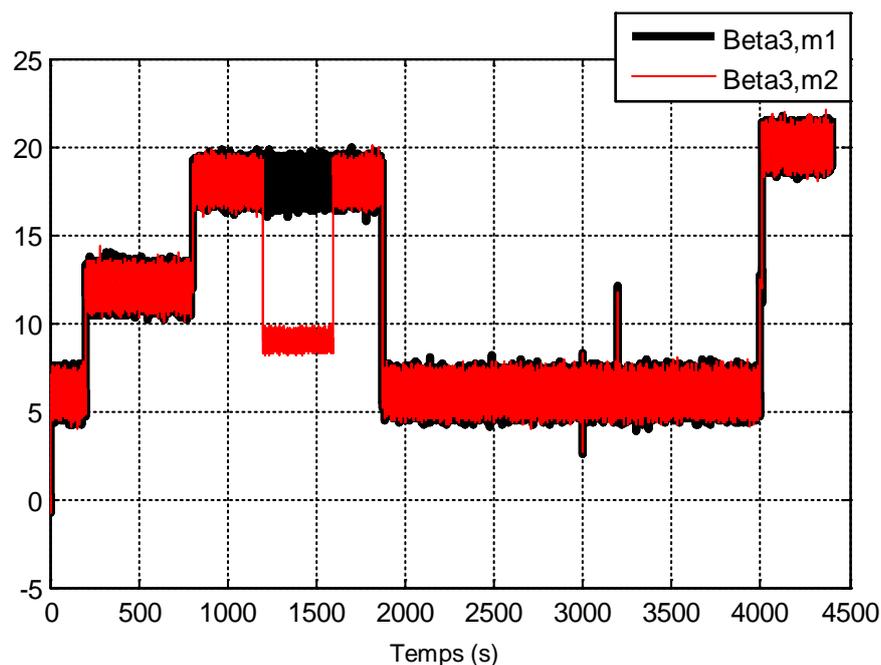


Figure 40.Évaluation des mesures  $\beta_{3,m1}$  (en rouge) et  $\beta_{3,m2}$  (en noirs) avec défaut de capteur et d'actionneur concernant la pale 3

La figure 41 représente les deux résidus délivrés par OBS1 et OBS2. Les deux défauts sont détectables dans les intervalles de temps mentionnés précédemment,

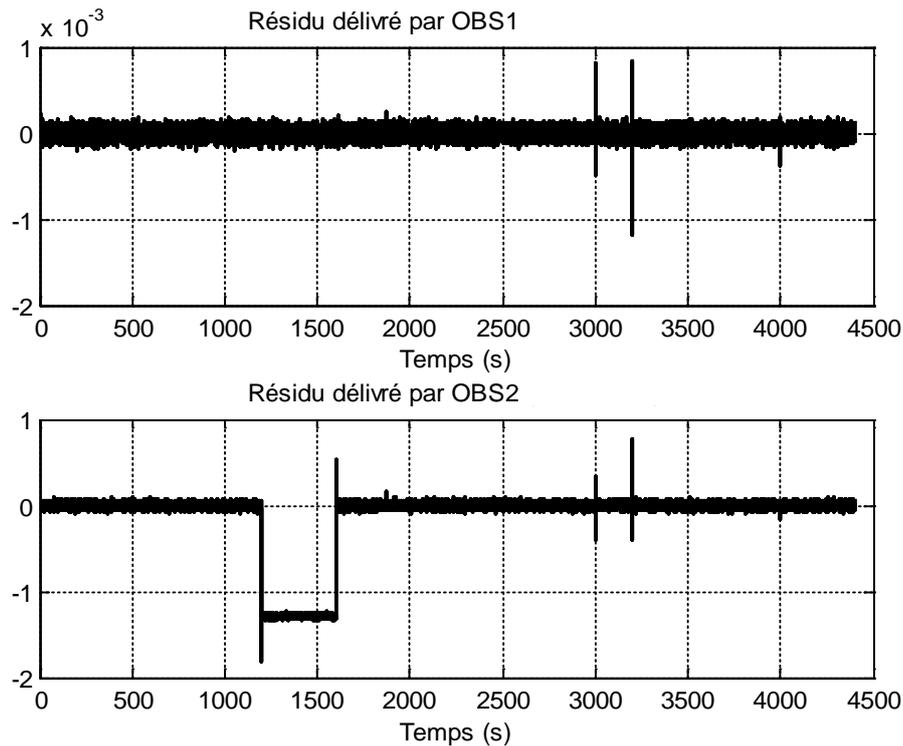


Figure 41. Reconstruction de défaut de capteur et d'actionneur dans le système de calage 3

Le temps de simulation est divisé 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 2 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 précédente, on constate qu'il existe un défaut d'actionneur avec un temps d'isolation égale à 1.6s ;

Les résultats obtenus par simulation sont très encourageants et montrent l'efficacité des méthodes de diagnostic à base de banc d'observateurs pour la détection et la localisation des défauts de capteur et d'actionneur dans le système des pales « pitch » principalement en présence de bruits.

### 4.3. Application de l'approche de détection des défauts de capteur et d'actionneur à base de DSMO

#### 4.3.1 Description et modélisation du système

Dans la partie suivante nous allons utiliser Le DSMO pour détecter et reconstruire les paramètres des défauts dans la dynamique de système pitch et de générateur du modèle éolien.

$$\begin{pmatrix} \dot{\beta} \\ \ddot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{pmatrix} \beta_r \quad (4.10)$$

$$\dot{T}_g(t) = \frac{1}{\tau_g} (T_{g,r} - T_g) \quad (4.11)$$

Les modifications de la dynamique de l'actionneur de l'angle de calage et du couple du générateur peuvent être examinées respectivement au moyen de modifications des paramètres ( $\omega_n$  et  $\xi$ ) et de constante de temps  $\tau_g$ . Les défauts d'offset de l'actionneur peuvent être modélisés en ajoutant un décalage au signal d'entrée [6] :

$$a_1 := \omega_n^2, \quad \longrightarrow \tilde{a}_1 = a_1 + \Delta a_1, \quad (4.12)$$

$$a_2 := 2\xi\omega_n, \quad \longrightarrow \tilde{a}_2 = a_2 + \Delta a_2, \quad (4.13)$$

Avec :  $\tilde{a}_1$  et  $\tilde{a}_2$  sont la somme de la valeur nominale ( $a_1, a_2$ ) et la valeur d'offset ( $\Delta a_1, \Delta a_2$ ).

La dynamique de système pitch altérée est alors donnée par :

$$\begin{pmatrix} \dot{\beta} \\ \ddot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ a_1 \end{pmatrix} \beta_r + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Delta a_1 & -\Delta a_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta a_1 \end{pmatrix} \beta_r \quad (4.14)$$

De manière analogue, la dynamique de couple du générateur modifiée peut être examinée en utilisant la valeur réciproque  $a_g$  de la constante de temps  $\tau_g$

$$a_g := \frac{1}{\tau_g}, \quad \longrightarrow \tilde{a}_g = a_g + \Delta a_g, \quad (4.15)$$

$$\dot{T}_g(t) = -a_g T_g + a_g T_{g,r} - \Delta a_g T_g + \Delta a_g T_{g,r} \quad (4.16)$$

Définir les matrices d'offset  $\Delta A$ , et  $\Delta B$  en tant que :

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0_{n-2 \times n-2} & 0_{n-2 \times 1} & 0_{n-2 \times 1} \\ 0_{1 \times n-2} & -\Delta a_g & 0 \\ 0_{1 \times n-3} & -\Delta a_1 & 0 & -\Delta a_2 \end{bmatrix} \text{ et } \Delta B = \begin{bmatrix} 0_{n-2 \times 1} & 0_{n-2 \times 1} \\ 0 & \Delta a_g \\ \Delta a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Où  $n$  dénote le numéro des états de système d'observateur, la dynamique du système d'observateur (sans termes de retour) avec la dynamique d'actionneur modifiée peut être écrite comme suit [6] :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^M h_i(z) (A_i x + Bu + B_{vi} v + \Delta Ax + \Delta Bu) \quad (4.17)$$

Pour reconstruire les paramètres de dynamique altérés  $\Delta a_1$ ,  $\Delta a_2$  et  $\Delta a_g$ , il faut trouver une matrice de défaut  $E$  et un vecteur de défaut d'actionneur  $f_a$  tels que :

$$E f_a = \Delta Ax + \Delta Bu = \left( 0 \quad \dots \quad 0 \quad \Delta a_g (T_{g,r} - T_g) \quad \Delta a_1 (\beta_r - \beta) \quad -\Delta a_2 \dot{\beta} \right)^T$$

$$\text{Avec: } E = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \text{ et } f_a = \begin{pmatrix} \Delta a_g (T_{g,r} - T_g) \\ \Delta a_1 (\beta_r - \beta) - \Delta a_2 \dot{\beta} \end{pmatrix}$$

Les défauts d'actionneur de couple  $\Delta a_g$  et de système de calage  $\Delta a_1$  et  $\Delta a_2$  peuvent être reconstruits. Le vecteur de défaut d'actionneur reconstruit est donc donné par :

$$\hat{f}_a = \begin{pmatrix} \Delta \hat{a}_g (T_{g,r} - T_g) \\ \Delta \hat{a}_1 (\beta_r - \beta) - \Delta \hat{a}_2 \dot{\beta} \end{pmatrix}$$

### 4.3.2 Discussions des résultats :

Les plages de fonctionnements d'angle de calage est  $0.01 \leq \beta \leq 0.03 (rad)$  et pour la vitesse du vent :  $11 \leq v \leq 17 (m/s)$ .

Les fonctions d'appartenance des variables de prémisses sont illustrées dans la figure 42.

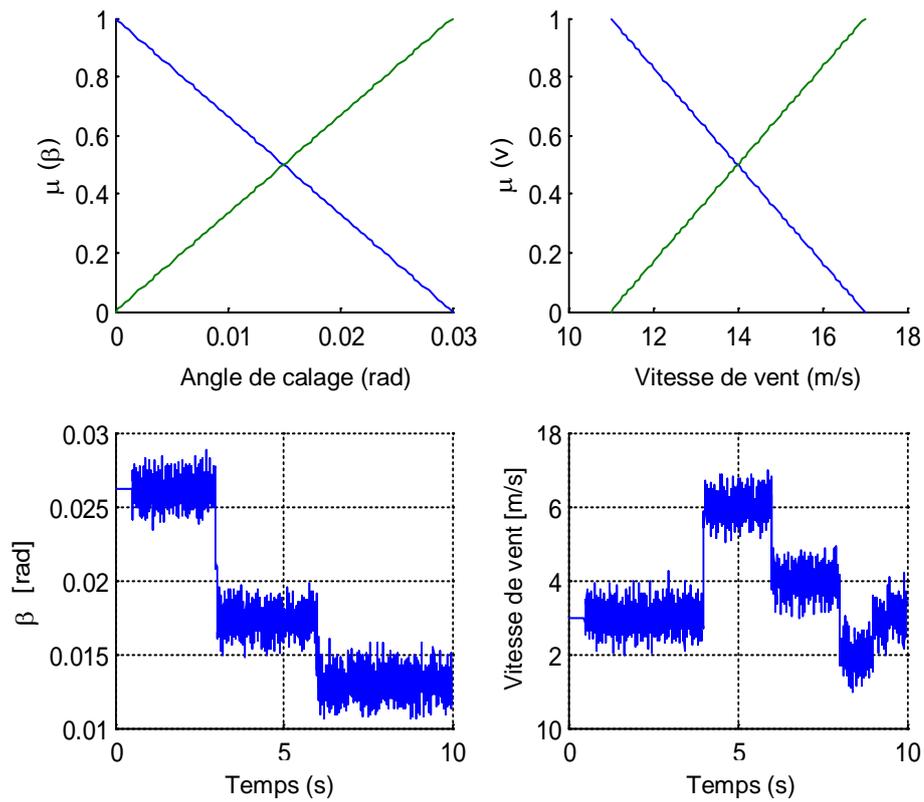


Figure 42. Variables de prémisses : fonctions d'appartenance triangulaire (en haut) et évolutions temporelles (en bas)

Les dynamiques des modèles locaux sont déduites du modèle non linéaire par linéarisation dynamique des points de fonctionnement.

La figure 43 montre les variables d'état du VSWECS dans le cas réel et estimé.

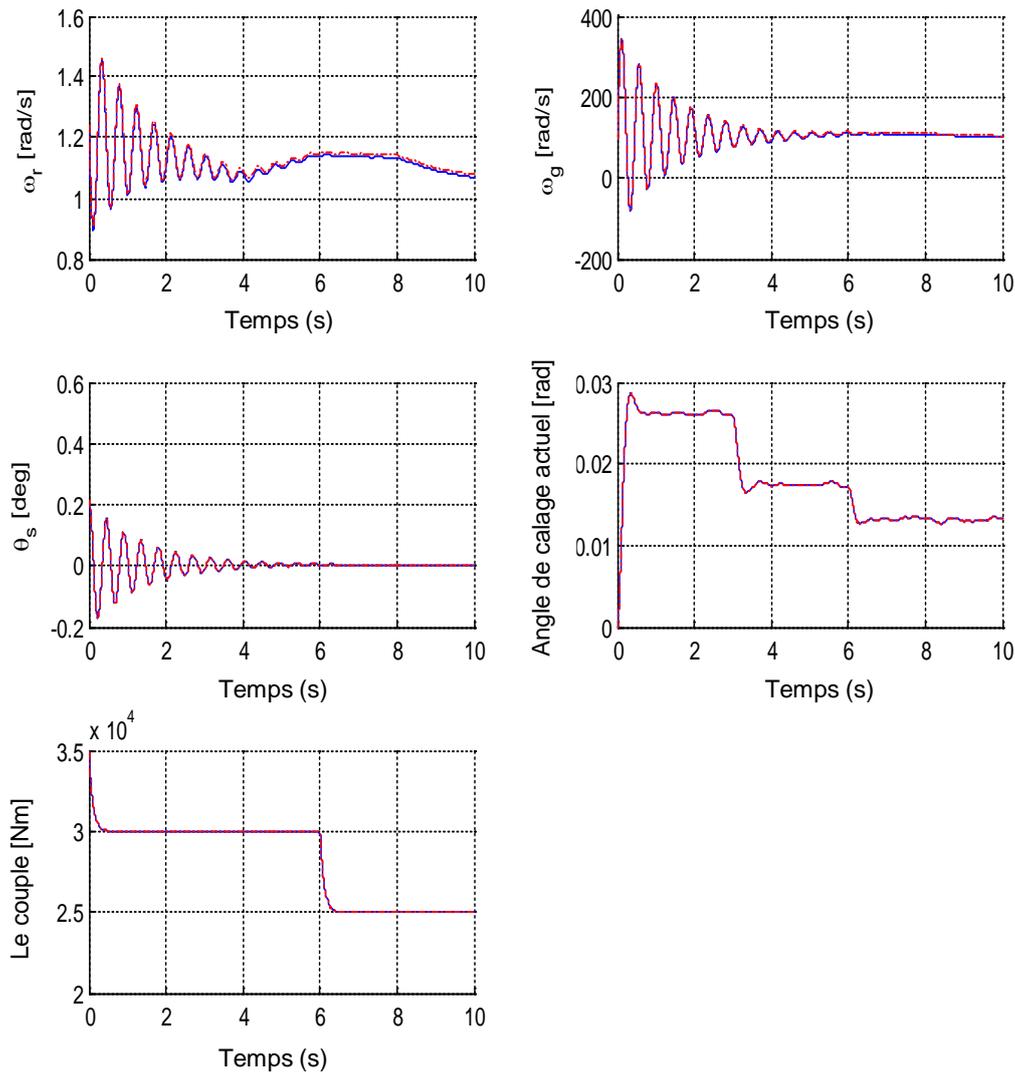


Figure 43. Évolution des états réels (ligne bleue) et estimés (ligne rouge) du DSMO basé sur le système VSWECS

Afin d'identifier les défauts d'actionneur pour le système d'angle de calage et pour le couple du générateur, un DSMO est utilisé pour estimer ces défauts.

La reconstruction des défauts de l'actionneur repose sur l'analyse des résidus générés par le DSMO.

Une teneur élevée en air dans l'huile qui représente un défaut d'actionneur dans le système d'angle de calage a été ajoutée entre 6 et 7 secondes.

Pour le couple du générateur, un offset de 10000 [Nm] était actif entre 5,5 s et 6,5 s.

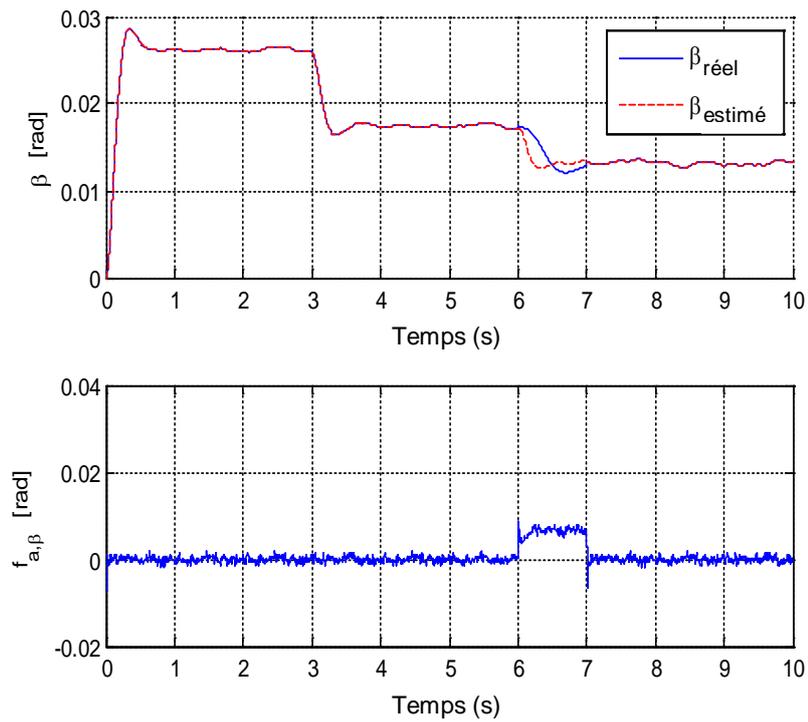


Figure 44. Angle de calage réel et estimé (en haut) et le vecteur de défaut d'actionneur reconstruit ( $\beta$ ) (en bas)

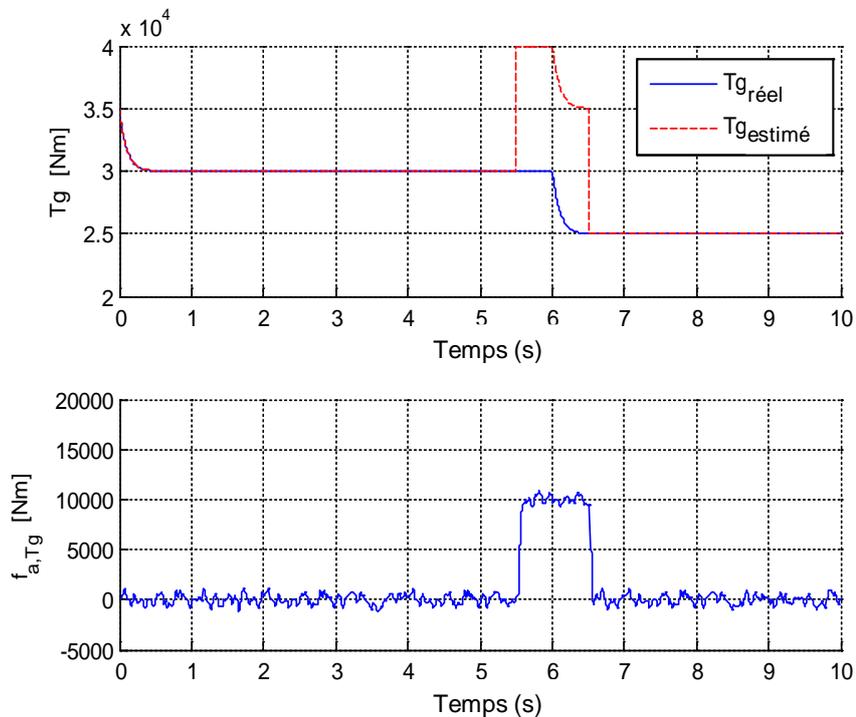


Figure 45. Couple du générateur réel et estimé (en haut) et le vecteur de défaut d'actionneur reconstruit ( $T_g$ ) (en bas)

Le haut de la figure 44 et de la figure 45 illustre l'angle de calage et le couple du générateur réel avec et sans scénario de défauts.

Les composants du vecteur de défaut reconstruit  $\hat{f}_a$  basé sur le DSMO sont représentés au bas des figures 44 et 45. On peut voir que les deux défauts d'actionneurs sont raisonnablement bien reconstruits. Des courts pics se produisent lorsque le défaut est activé/désactivé. Les temps de détection et de reconstruction des défauts pour l'angle de calage et pour le couple du générateur sont respectivement d'environ 0,48 s et 0,36 s. Le DSMO est donc une méthode très rapide et efficace pour détecter et reconstruire les défauts de l'actionneur.

Pour un défaut de capteur d'angle de calage, un facteur de gain additif (1,5 rad) a été ajouté entre 4 s et 5 s.

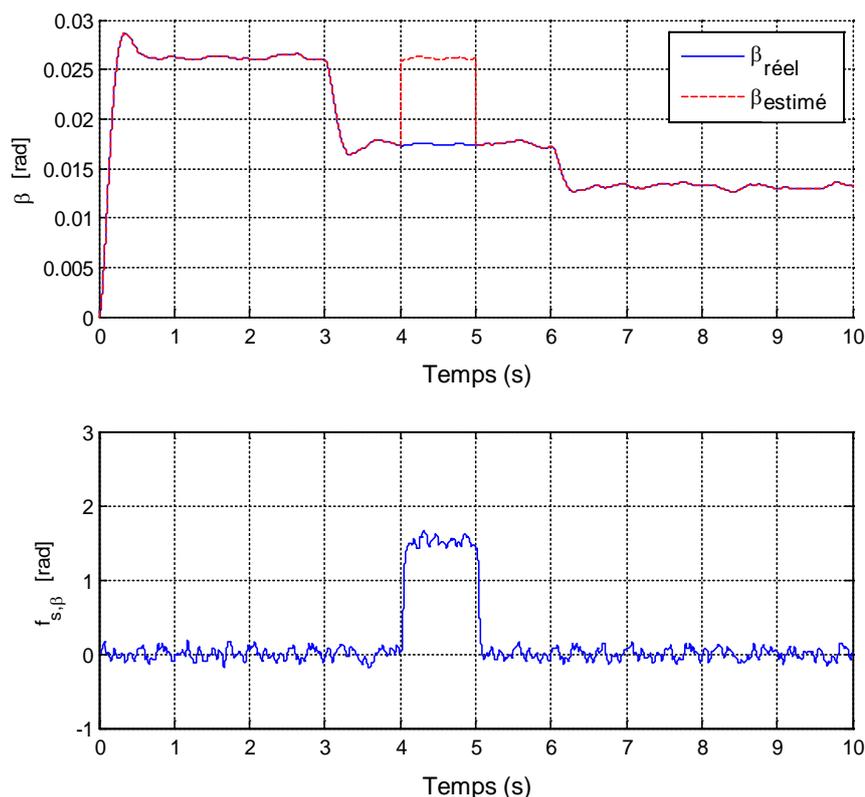


Figure 46. Angle de calage réel et estimé (en haut) et le vecteur de défaut du capteur reconstruit ( $\beta$ ) (en bas)

L'angle de calage réel avec et sans défaut du capteur est donné par le haut de la figure 46. Le bas de la figure 46 montre que le résidu n'est pas nul dans le cas d'absence de défaut en raison

de présence de bruit de capteur ; le résidu augmente de manière significative après l'apparition de panne. Le défaut est détecté, isolé et reconstruit en environ 0,26 s.

#### 4.4. 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. Elles doivent donc être surveillées en permanence par des méthodes FDI à la fois efficaces, rapides et sûres.

Dans ce travail, on a utilisé deux méthodes de diagnostic à base d'observateurs :

- La première méthode consiste à utiliser un banc d'observateurs type GOS pour la détection et la localisation des défauts de capteurs et d'actionneurs dans le système de calage des pales éolienne « pitch ». Les résultats obtenus par simulation sont très encourageants, même en présence de bruits.

Ce banc d'observateur permet une meilleure performance de 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.

- La deuxième méthode est basée sur l'emploi des observateurs décentralisés à mode glissant (DSMO) pour détecter et reconstruire les défauts de capteur et actionneur dans le système VSWECS. Cette stratégie de diagnostic permet la détection et la localisation au moyen de la reconstruction du défaut du capteur d'angle de calage et de tout autre défaut impliquant un changement instantané de la dynamique du système. En utilisant le concept d'estimation d'état et dans des conditions normales de bon fonctionnement, l'observateur poursuit les variables internes ainsi que celles des sorties, généralement après un temps très court. Après la phase transitoire, tout autre écart d'estimation est pris comme indicateur d'anomalies. La performance et l'efficacité de ce type d'observateur ont été évaluées et confirmées. Enfin, des travaux supplémentaires pourraient constituer les possibilités de mise en œuvre pratique de cette stratégie.

#### 4.5. Références :

- [1] Esbensen T, Sloth C. Fault diagnosis and fault tolerant control of wind turbines. Master's Thesis. Department of Electronic Systems, Aalborg University, Denmark. 2009.
- [2] Odgaard P.F et Johnson K. Wind turbine fault detection and fault tolerant control – an enhanced benchmark challenge. American Control Conference (ACC), 4447-4452. 2013.
- [3] Odgaard P.F et Stoustrup J. Unknown input observer based scheme for detecting faults in a wind turbine converter. In Proceedings of 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. 2009.
- [4] Zhang X, Zhang Q, Zhao S, Ferrari R, Polycarpou M, Parisini T. 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. 2011.
- [5] Boumaiza A, Arbaoui F, Saïdi M.L. Diagnostic des défauts à base d'observateur dans un système éolien. Méditerranéen Journal of Modeling and Simulation 1(1) :045-055. 2014.
- [6] Georg S. et Schulte H. Diagnosis of actuator parameter faults in wind turbines using a takagi-sugeno sliding mode observer. Intelligent Systems in Technical and Medical Diagnostics. Springer, Berlin, Heidelberg. 2014.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-39881-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39881-0_2).

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

De nos jours, les systèmes de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable (VSWECS) suscitent un intérêt considérable car ils sont capables de maximiser la capture d'énergie et de réduire la charge aérodynamique pour une large gamme de vitesses de vent. Dans les systèmes WECS à vitesse variable, un convertisseur électronique dissocie la vitesse de rotation de la fréquence du réseau, permettant ainsi à l'éolienne de fonctionner dans des conditions de fonctionnement optimales à différentes vitesses de vent.

Le travail effectué dans cette thèse a pour objectif la détection et la localisation des défauts type capteur et actionneur dans le système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable (VSWECS).

Pour ce faire, on a présenté des généralités sur l'énergie éolienne, les différents types des turbines éoliennes, leurs composantes, leurs modes de fonctionnement (*stall* ou *pitch*) et les stratégies de control de la turbine éolienne.

Cette étude a été orientée vers une éolienne à axe horizontal de puissance fonctionnant à vitesse variable (VS-VP).

La modélisation considérée est basée sur une interpolation entre les modèles linéaires locaux. Les  $N$  sous-modèles décrivent le comportement dynamique du système non linéaire dans les différentes zones de fonctionnement.

Le développement dirigé dans ce travail constitue une contribution liée à une méthode de modélisation multi-modèle de système VSWECS à paramètres quasi variant (Quasi LPV). Cette approche est basée sur une transformation polytopique convexe pour obtenir des modèles locaux permettant d'approximer le comportement global du système. Elle est basée sur la technique de linéarisation par secteur non linéaire qui permet d'obtenir une forme multi-modèle équivalente au système non linéaire initial.

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de détection et de localisation de défauts. On a retenu les méthodes de diagnostic à base de modèles et on s'est concentré sur les méthodes à base d'observateurs non linéaires. Les observateurs sont souvent utilisés pour la commande d'un système, ils peuvent aussi servir au diagnostic de défaut ; l'objectif du diagnostic par observateurs est donc double. Dans ce contexte, on a montré l'utilisation du mode glissant

dans la conception des observateurs pour le système VSWECS, où la conception de Walcott et Žak a été prospectée.

L'inconvénient de cette méthode réside dans le calcul de la variable glissante, car dans le cas où la matrice  $F$  est orthogonale au vecteur  $Ce(t)$ , la convergence de l'observateur n'est pas garantie. Pour résoudre ce problème, Edwards et Spurgeon ont élaboré un observateur, en utilisant la forme canonique du système, basé sur la structure de l'observateur de Walcott et Žak où le calcul de la variable glissante dépend de l'existence de quelques matrices appropriées et de l'erreur de sortie.

On a utilisé un banc d'observateurs type GOS pour détecter et localiser les défauts des capteurs et actionneurs dans le système des pales puis un observateur décentralisé à mode glissant (DSMO), pour l'estimation et la reconstruction d'état du système et des défauts de capteurs et actionneurs qui affectent l'angle de calage des pales et le couple de générateur.

La détection de défaut par banc d'observateurs type GOS est accomplie par le biais d'une vérification de mesures de capteurs. Les résidus générés reflètent les défauts qui pourraient apparaître et qui devraient converger vers zéro dans le cas sain et diverger de zéro en cas de dysfonctionnement. Le défaut détecté doit être estimé. Cette estimation préciserait le type de défaut, sa durée, son amplitude et éventuellement son évolution probable.

Au cours des dernières années, les techniques du mode glissant ont trouvé une large application dans les domaines de la détection, la reconstruction des défauts et la surveillance. Leurs principaux avantages dans ces domaines sont une robustesse fondamentale contre certains types de variations des paramètres et la reconstruction des erreurs et/ou des valeurs non mesurables des paramètres du système en utilisant le principe du signal d'injection équivalent.

Partant de ce principe, on a utilisé un observateur décentralisé à mode glissant (DSMO) qui est une extension de l'observateur de Walcott et Žak développée par d'Edwards et Spurgeon. La détection, la localisation ainsi que la reconstruction des défauts capteurs et actionneurs ont été bien étudiées. Les performances et l'efficacité de cet observateur ont été prouvées.

Comme les temps de détection et de reconstruction sont très courts alors une perspective évidente serait d'explorer les possibilités du diagnostic des défauts capteurs et actionneurs

dans le système VSWECS en temps réel par la méthode utilisant l'observateur décentralisé en mode glissant.