

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA Béjaïa

Faculté de technologie

Département Automatique, Télécommunication et Electronique

# Mémoire De Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master en électronique

**Option :** Automatique

## Thème

---

Détection et diagnostic de défauts dans  
une éolienne à deux masses

---

**Présenté par :**

M<sup>r</sup> BENMOUHOU B Mohamed Raouf

M<sup>elle</sup> BENMOUHOU B Sabrina

**Devant le jury :**

M<sup>r</sup> K. MOKRANI

M<sup>r</sup> F. TAFININE

**Encadré par :**

M<sup>r</sup> H. LEHOUCHE

Promotion

**2014 - 2015**



# *Remerciements*

# Remerciements

*Par le biais de ce travail, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces longues années, grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*On tient à exprimer notre gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur monsieur H.Lehouche, pour nous avoir proposés le thème de ce mémoire et nous avoir dirigés, aidés et conseillés tout au long de notre travail.*

*Nous tenons aussi à remercier le président et les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Nos vifs remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département Génie Electrique de l'université de Bejaia pour la formation qu'ils nous ont assurée au long de notre cursus universitaire.*

*Pour terminer, on tient à remercier tous nos amis qui nous ont aidés et nous ont apportés leur soutien moral et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*



# *Dédicaces*

# Dédicaces

*Il est naturel que ma pensée la plus forte aille vers l'amour de ma vie, vers celle qui m'a toujours soutenu, poussé et motivé dans mes études, vers celle grâce à qui je suis ce que je suis aujourd'hui. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, elle apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Je t'aime **maman** !*

## **Je dédie ce travail à...**

*Mon cher papa et ma sœur adorée*

*Mes chers oncles et leurs épouses*

*Mes adorables tantes et leurs époux*

*Tous mes cousins et cousines*

*Ma mémé, ma mani et toute ma famille*

*Tous mes amis*

*Mon très cher ami, mon frère, mon tout Farid Kared qui m'a toujours épaulé.*

*Mme Fatiha Gani que n'aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer tout ce qu'elle mérite pour son assistance et sa disponibilité.*

*Tous les enseignants que j'ai eus durant vingt ans d'étude et de formation, sans lesquels je ne serai jamais parvenu à ce stade.*

*Mr Mustapha Louiba que je ne saurais suffisamment remercier pour sa gentillesse et ses précieux conseils tout au long de mon stage au sein de la Sonatrach/DRGB.*

*Mon adorable ami Kouceila Soualah qui était à mes cotés durant tous les moments difficiles que j'ai vécus.*

*Enfin, Il serait ingrat de ma part de ne pas dédier ce travail à mon cher cousin Mustapha Rahmani qui m'a aidé et fourni tous les documents nécessaires pour réaliser ce travail.*

*Raouf.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail*

*A mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours soutenu, et à l'intérêt qu'ils ont toujours porté pour mes études, je ne les remercierais jamais assez, pour tout ce qu'ils font. Que dieu me les protège.*

*A ma sœur Thinkinane, à Yougourtha, à Islam et à mon petit frère Mohamed ;*

*A ma grand-mère*

*A mes tantes et oncles*

*A mes cousins et cousines*

*A tous mes amis*

*A toute personne chère à mes yeux*

*A tous mes camarades de la promotion 2014-2015 automatique*

*Enfin Je voudrais remercier tous les gens qui sont entrés dans ma vie, et qui l'ont ainsi rendu magnifique.*

*Sabrina.*



# *Sommaire*



## SOMMAIRE

<b>Remerciements</b> .....	<b>i</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>ii</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>v</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>ix</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>xi</b>
<b>Liste des abréviations et symboles</b> .....	<b>xii</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etude et modélisation d'un système éolien</b> .....	<b>4</b>
I.1 Introduction .....	4
I.2 Généralités sur les systèmes éoliens .....	4
I.2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	4
I.2.2 Energie éolienne dans le monde .....	6
I.2.3 Les différents types d'éoliennes.....	6
I.2.3.1 Classification selon la taille.....	7
I.2.3.2 Classification selon le type d'orientation .....	7
I.2.4 Conception d'une éolienne a axe horizontal.....	11
I.2.5 La chaîne de transformation énergétique.....	13
I.2.6 Aérodynamique.....	14
I.2.6.1 Loi de Betz .....	14
I.2.7 Stratégies de commande de la turbine .....	17
I.3 Modélisation et simulation d'une éolienne à deux masses.....	18
I.3.1 Présentation du modèle de l'aérogénérateur .....	18
I.3.2 Hypothèses simplificatrices du modèle .....	20
I.3.3 Aérodynamique du modèle .....	20
I.3.3.1 Puissance aérodynamique .....	20
I.3.3.2 Coefficient de puissance aérodynamique .....	21
I.3.3.3 Couple aérodynamique.....	23
I.3.4 Dynamique du modèle .....	23
I.3.5 Simulation du modèle .....	26
I.3.5.1 Profil du vent.....	26

I.3.5.2	Résultats de simulation.....	27
I.3.5.3	Discussion des résultats obtenus .....	29
I.4	Conclusion .....	30
<b>Chapitre II : Différentes méthodes de détection et de diagnostic.....</b>		<b>31</b>
II.1	Introduction .....	31
II.2	Les différentes notions utilisées en diagnostic .....	31
II.3	Classification des défauts .....	32
II.3.1	Emplacement .....	32
II.3.1.1	Les défauts capteurs .....	33
II.3.1.2	Les défauts actionneurs.....	33
II.3.1.3	Les défauts composants ou systèmes .....	33
II.3.2	Modélisation .....	34
II.3.3	Caractéristiques temporelles.....	34
II.4	Surveillance .....	35
II.5	Diagnostic.....	35
II.5.1	Détection.....	35
II.5.2	Localisation .....	35
II.5.3	Identification.....	35
II.6	Présentation des méthodes de diagnostic .....	36
II.6.1	Les méthodes externes de diagnostic.....	36
II.6.1.1	Diagnostic par traitement du signal .....	37
II.6.1.2	Diagnostic par signatures .....	37
II.6.1.3	Diagnostic par reconnaissance de formes .....	38
II.6.1.4	Réseaux de neurones.....	38
II.6.2	Les méthodes internes de diagnostic .....	39
II.6.2.1	Génération de résidus.....	39
II.6.2.2	Prise de décision .....	40
II.7	Redondances d'informations.....	40
II.7.1	Redondance physique ou matérielle .....	41
II.7.2	Redondance analytique.....	41
II.8	Méthode de diagnostic à base de modèle .....	42
II.8.1	Méthode de diagnostic à base de modèles qualitatifs.....	42

II.8.2 Méthode de diagnostic à base de modèles quantitatifs.....	43
II.8.3 Espace de parité.....	43
II.8.4 Méthode d'estimation paramétrique.....	43
II.8.5 Méthode de diagnostic à base d'observateurs.....	44
II.8.5.1 Observateurs d'état.....	44
II.8.5.2 Observateur à entrées inconnues.....	45
II.8.5.3 Structuration des résidus par un banc d'observateurs.....	46
II.8.5.4 Les défauts actionneurs.....	47
II.8.5.5 Les défauts capteurs.....	48
II.9 Principe d'un observateur.....	49
II.9.1 Équation d'état.....	49
II.9.2 Observabilité des systèmes linéaires.....	49
II.9.3 Observateurs des systèmes linéaires.....	50
II.9.3.1 Filtre de Kalman.....	50
II.9.3.2 Observateur complet ou de Luenberger.....	51
II.10 Exemple de conception d'un observateur d'état complet.....	53
II.10.1 Simulation sous Matlab.....	55
II.11 Conclusion.....	56

**Chapitre III : Détection de défauts dans une éolienne à deux masses à base d'observateurs.....57**

III.1 Introduction.....	57
III.2 Fonctionnement général.....	58
III.2.1 Modèle Simulink simplifié.....	58
III.2.2 Linéarisation du modèle.....	59
III.3 Système de contrôle par calage.....	61
III.3.1 Schéma bloc de l'actionneur.....	62
III.3.2 Les différents défauts affectant le système hydraulique.....	62
III.4 Les défauts possibles du modèle.....	63
III.4.1 Défauts capteurs.....	64
III.4.2 Défauts actionneurs.....	64
III.4.3 Défaut système.....	65
III.5 Récapitulatif des défauts à détecter.....	65

III.6 Diagnostic des défauts dans une éolienne.....	66
III.6.1 Principe général.....	66
III.6.2 Diagnostic des défauts capteurs .....	67
III.6.3 Diagnostic des défauts actionneurs .....	68
III.7 Résultats du diagnostic .....	68
III.7.1 Cas sans défaut .....	68
III.7.2 Cas du premier défaut actionneur.....	70
III.7.3 Cas du premier défaut capteur.....	71
III.7.4 Cas du deuxième défaut capteur.....	73
III.7.5 Cas du deuxième défaut actionneur .....	74
III.7.6 Cas du défaut système .....	76
III.8 Conclusion .....	78
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>79</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>81</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>85</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>87</b>



# *Liste des figures*

## Liste des figures

<b>Fig. I.1</b>	– Conversion de l'énergie cinétique du vent. ....	5
<b>Fig. I.2</b>	– Capacité éolienne installée dans le monde entre 1997 et 2014.....	6
<b>Fig. I.3</b>	– a) une ferme éolienne onshore. b) une ferme éolienne offshore.....	7
<b>Fig. I.4</b>	– Eoliennes à axe vertical de type Savonius.....	8
<b>Fig. I.5</b>	– Schéma de principe du rotor de Savonius.....	9
<b>Fig. I.6</b>	– Eoliennes à axe vertical de type Darrieus.....	9
<b>Fig. I.7</b>	– Moulin à vent et éolienne à axe horizontal.....	10
<b>Fig. I.8</b>	– Schéma représentant d'une éolienne à axe horizontal : amont et aval. ....	11
<b>Fig. I.9</b>	– Structure générale d'une éolienne à axe horizontal.....	11
<b>Fig. I.10</b>	– Schéma de la nacelle.....	12
<b>Fig. I.11</b>	– Chaîne de transformation énergétique.....	13
<b>Fig. I.12</b>	– Tube de courant autour d'une éolienne.....	15
<b>Fig. I.13</b>	– coefficient de puissance.....	16
<b>Fig. I.14</b>	– coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes.....	17
<b>Fig. I.15</b>	– Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne.....	17
<b>Fig. I.16</b>	– Schéma du dispositif d'entraînement à deux masses.....	19
<b>Fig. I.17</b>	– Colonne d'aire incidente sur le rotor.....	21
<b>Fig. I.18</b>	– Coefficient de puissance $C_p$ en fonction de $\beta$ et $\lambda$ . ....	22
<b>Fig. I.19</b>	– Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.....	25
<b>Fig. I.20</b>	– Bloc Simulink de la turbine éolienne.....	26
<b>Fig. I.21</b>	– Profil du vent en une vitesse moyenne de 7 m/sec.....	27
<b>Fig. I.22</b>	– Allure de la vitesse de rotation du rotor.....	28
<b>Fig. I.23</b>	– Allure de la vitesse de rotation de la génératrice.....	28
<b>Fig. I.24</b>	– Evaluation de la puissance mécanique.....	29
<b>Fig. II.1</b>	– Différents types de défauts agissants sur un système.....	33
<b>Fig. II.2</b>	– Les défauts selon leur représentation.....	34
<b>Fig. II.3</b>	– Répartition des défauts selon le comportement temporel.....	34
<b>Fig. II.4</b>	– Procédure de détection et d'isolation de défauts.....	36
<b>Fig. II.5</b>	– Schéma général représentant les étapes de diagnostic.....	38
<b>Fig. II.6</b>	– Schéma représentant la redondance matérielle.....	41

<b>Fig. II.7</b> – Principe de diagnostic avec modèle .....	42
<b>Fig. II.8</b> – Génération des résidus par utilisation des observateurs d'état.....	45
<b>Fig. II.9</b> – Localisation de défauts actionneurs .....	47
<b>Fig. II.10</b> – Localisation de défauts capteurs .....	48
<b>Fig. II.11</b> – Diagramme structurel d'un observateur de Luenberger.....	52
<b>Fig. II.12</b> – Schéma bloc de l'exemple sur Simulink .....	56
<b>Fig. II.13</b> – Résultat de la simulation .....	56
<b>Fig. III.1</b> – Destruction d'une éolienne par prise de feu. ....	57
<b>Fig. III.2</b> – Une vue d'ensemble du modèle de simulation utilisé pour la détection des défauts de l'éolienne CART.....	58
<b>Fig. III.3</b> – Schéma bloc du système hydraulique de l'actionneur.....	62
<b>Fig. III.4</b> – Réponses à un échelon des différents modèles d'actionneurs. ....	63
<b>Fig. III.5</b> – Principe de la génération de résidus à l'aide d'un observateur. ....	67
<b>Fig. III.6</b> – Schéma de la génération des résidus dans le cas des défauts capteurs.....	67
<b>Fig. III.7</b> – Schéma de la génération des résidus dans le cas des défauts actionneurs.....	68
<b>Fig. III.8</b> – Evolution de la sortie et de son estimée dans le cas nominal. ....	69
<b>Fig. III.9</b> – Estimation de l'erreur de sortie (cas nominal).....	69
<b>Fig. III.10</b> – Evolution de $\omega g$ en configuration nominale et défectueuse. ....	70
<b>Fig. III.11</b> – Résidu de détection et d'isolation du premier défaut actionneur de la première pale. ....	71
<b>Fig. III.12</b> – La vitesse $\omega g$ en configuration nominale et en présence du premier défaut capteur....	72
<b>Fig. III.13</b> – Résidu de détection et d'isolation du premier défaut capteur.....	72
<b>Fig. III.14</b> – La vitesse $\omega g$ en configuration nominale et en présence du deuxième défaut capteur.....	73
<b>Fig. III.15</b> – Résidu de détection et d'isolation du deuxième défaut capteur. ....	74
<b>Fig. III.16</b> – La vitesse $\omega g$ en configuration nominale et en présence du deuxième défaut actionneur de la deuxième pale.....	75
<b>Fig. III.17</b> – Résidu de détection et d'isolation du deuxième défaut actionneur. ....	76
<b>Fig. III.18</b> – La vitesse $\omega g$ en configuration nominale et en présence d'un défaut système.....	77
<b>Fig. III.19</b> – Résidu de détection et d'isolation du défaut système.....	77



# *Liste des tableaux*



## Liste des tableaux

<b>Tableau. I-1</b> - Classification des turbines éoliennes .....	7
<b>Tableau. I-2</b> - Liste des symboles du modèle à deux masses .....	19
<b>Tableau. III-1</b> - Paramètres des défauts possibles dans le système hydraulique de L'actionneur .....	63



# *Liste des abréviations et symboles*

## **Abréviations**

<b>CART</b>	Control Advanced Research Turbine
<b>GWEC</b>	Conseil mondial de l'énergie éolienne
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>FDI</b>	Fault Detection and Isolation
<b>RdF</b>	La reconnaissance de formes.
<b>RNA</b>	Les réseaux de neurones artificiels
<b>RFR</b>	Réseaux à Fonction de base Radiales
<b>UIO</b>	Unknown Input Observer
<b>GOS</b>	Generalized Observer Scheme
<b>DOS</b>	Dedicated Observer Scheme
<b>NREL</b>	National Renewable Energy Laboratory

## Symboles

$V$	Vitesse du vent
$\rho$	Masse volumique de l'air
$R$	Rayon de rotor
$P_a$	Puissance aérodynamique
$T_a$	Couple aérodynamique
$\lambda$	Vitesse spécifique
$\beta$	Angle de calage des pales
$C_p(\lambda, \beta)$	Coefficient de puissance
$C_{p\_max}(\lambda, \beta)$	Limite de Betz du coefficient de puissance
$C_q(\lambda, \beta)$	Coefficient du couple
$\omega_t$	Vitesse angulaire du rotor
$\omega_g$	Vitesse angulaire de la génératrice
$\omega_{ls}$	Vitesse angulaire de l'arbre lent
$\omega_{hs}$	Vitesse angulaire de l'arbre rapide
$\theta_t$	Position angulaire du rotor
$\theta_g$	Position angulaire de la génératrice
$T_{em}$	Couple électromagnétique de la génératrice
$T_{ls}$	Couple de l'arbre lent
$T_{hs}$	Couple de l'arbre rapide
$J_r$	Inertie des masses du côté du rotor
$J_g$	Inertie des masses du côté de la génératrice
$K_r$	Coefficient de frottements externes du rotor
$K_g$	Coefficient de frottements externes de la génératrice
$B_{ls}$	Coefficient de torsion de l'arbre lent
$K_{ls}$	Coefficient de frottements sur l'arbre lent
$n_g$	Rapport de transmission du multiplicateur



# ***Introduction Générale***

## **Introduction générale**

Pour vivre, l'homme a toujours eu besoin d'énergie. Mais depuis le dix-huitième siècle, il puise dans des ressources non renouvelables qui s'épuisent de jours en jours. L'énergie la plus utilisée dans le monde est d'origine fossile, à savoir : le charbon, le pétrole ou le gaz ; cependant, ces réserves ne se trouvant pas en quantité suffisante sur la terre pour les besoins énergétiques des générations futures, d'où la nécessité de découvrir de nouvelles sources. Au-delà de leur épuisement, ces énergies polluent et aggravent l'effet de serre déjà bien prévalent. L'homme, suite à ses constats, prédit, sur le long terme, la menace que peut constituer la pollution pour la terre et son équilibre. Etant donné l'épuisement des sources d'énergies conventionnelles et les pressions croissantes qui s'exercent sur les pays du monde entier pour qu'ils réduisent leurs émissions de gaz à effet de serre ; il n'est pas surprenant de voir les autorités publiques s'intéresser aux sources d'énergies renouvelables ; à ce titre, l'énergie éolienne attire particulièrement leur attention et est en passe de devenir la source d'électricité dont la croissance sera la plus rapide ; à cet effet, notre travail se focalise sur un choix du système éolien.

L'utilisation des éoliennes n'est pas nouvelle, celles-ci sont exploitées par l'homme depuis les temps immémoriaux. La maîtrise du vent est attribuée aux chinois qui furent les premiers à voguer sur l'eau au moyen de radeaux de fortune. Cependant, il faut attendre jusqu'au moyen âge pour voir l'énergie éolienne utilisée afin de faciliter les travaux et donner un coup de pouce à l'irrigation ; mais du moulin à vent du début du second millénaire aux éoliennes sophistiquées du troisième, il y a eu une grande évolution.

Le recours à l'utilisation de l'énergie éolienne a connu beaucoup de croissance. Depuis lors, l'éolienne a nettement évolué et spécialement dans la deuxième partie du vingtième siècle, étant donné qu'elle sert, à présent, à la production de l'énergie électrique. Cette évolution est due au fait que le vent est une source assez abondante et pas cher. Toutefois, les éoliennes sont coûteuses à installer, exploiter et entretenir et donc jusqu'à présent, elles ne peuvent pas rivaliser avec les énergies traditionnelles. Pour justifier leur coût d'installation et de maintenance si élevé, la tendance au cours des deux dernières décennies a été de construire toujours des turbines plus grandes avec des rendements élevés.

Aujourd'hui des turbines qui génèrent entre 5 et 6 MW ou plus sont en développement ; dans le but de répondre aux questions d'esthétique, d'utilisation de terre, du

bruit et d'émissions provenant des installations onshore, les installations des éoliennes au large des côtes sont de plus en plus développées ; toutefois, ces dernières sont des cibles de développements moins accessibles.

Mais aussi, ces éoliennes peuvent être affectées par des dégradations de fonctionnement des capteurs (dérives par exemple), des actionneurs (perte d'efficacité des actionneurs destinés à orienter les pales), des défauts internes à la génératrice (court-circuit entre spires d'enroulements) ou des défauts externes (creux de tension au niveau du réseau). Il s'agit de déceler et de localiser ces dégradations le plus rapidement possible avant qu'elles n'induisent une défaillance afin de pouvoir prendre des mesures appropriées. Ces mesures consistent à reconfigurer le système de régulation de l'éolienne afin qu'elle puisse continuer à fonctionner, éventuellement dans un mode dégradé ou, si nécessaire, à réaliser une mise à l'arrêt de façon sûre.

Par conséquent, beaucoup d'efforts sont nécessaires pour améliorer la fiabilité des éoliennes et réduire le temps d'arrêt. Pour assurer ces objectifs, le diagnostic de pannes conçu avec soin et le système de contrôle tolérant aux fautes jouent un rôle très critique. Le temps de détection, d'isolation et d'accommodation des défauts à venir à partir de différents capteurs et actionneurs ou de détérioration des systèmes/sous-systèmes est crucial pour le fonctionnement rentable des éoliennes et leur succès commercial ultérieur dans le marché de l'énergie.

La nécessité du diagnostic de défauts pour les systèmes industriels a conduit au développement de nouvelles techniques, parmi ces dernières, l'automatique industrielle introduit les notions d'observation des systèmes.

L'estimation de l'état d'un système s'opère par le biais d'un système dynamique auxiliaire, couramment appelé *estimateur d'état* ou *observateur*, il est conçu sur la base d'un modèle capable de représenter avec précision le comportement réel du système. La complexité de ce modèle doit en outre demeurer admissible et ce, de façon à rendre la tâche de synthèse et de mise en œuvre de l'observateur la plus aisée possible (étude de sa stabilité et de la convergence de l'erreur d'estimation, minimisation du volume de calculs, etc.). Les premières études relatives à l'estimation d'état ont été menées à partir de modèles de structure linéaire relativement peu complexes. Les outils théoriques de synthèse d'observateurs, basés

sur ce genre de modèle, semblent avoir atteint une certaine maturité et de nombreuses techniques d'estimation d'état sont disponibles.

Le travail présenté, dans le cadre de ce mémoire, étale la technique de modélisation d'un système éolien, l'estimation d'état et le diagnostic de défauts de fonctionnement à base d'observateur. Notre travail s'articule alors autour de trois chapitres, à savoir :

Le premier chapitre est divisé en deux parties; la première partie est consacrée à une description générale du contexte de la production de l'énergie éolienne et les différents types d'éoliennes, pour se restreindre par la suite à l'étude d'une éolienne à axe horizontale. La deuxième partie de ce chapitre porte sur la modélisation d'une éolienne à vitesse variable. Après avoir brièvement décrit le mécanisme de fonctionnement de celle-ci, on y présente le principe d'extraction de l'énergie du vent. La modélisation du comportement aérodynamique et mécanique est ensuite formulée pour aboutir à un modèle global non linéaire à deux masses.

Le deuxième chapitre aborde quelques concepts généraux sur le diagnostic. Il sera notamment consacré aux concepts fondamentaux du diagnostic des systèmes à bases de modèles et aux différentes méthodes et aborde la technique de diagnostic à base d'observateurs où il sera question de détecter et d'isoler d'éventuels défauts système, actionneurs et capteurs.

Et enfin, le troisième chapitre constitue le cœur de notre travail, il traitera notre modèle éolien dont nous détectons quelques défauts par le biais d'un observateur d'état (Observateur complet ou de Luenberger) que nous avons choisi par son illustration sous MATLAB/Simulink. Nous finirons ce manuscrit par une conclusion générale et quelques perspectives, une annexe contenant les paramètres de l'éolienne CART et une bibliographie.





## *Chapitre I*

# *Etude et modélisation d'un système éolien*

## Chapitre I : Etude et modélisation d'un système éolien

### I.1 Introduction

Le vent est un déplacement d'air qui résulte de l'équilibrage de plusieurs forces en constantes interactions ; Les principales forces impliquées sont :

- Les forces de pression, causées par l'inégale répartition de la chaleur solaire reçue par la terre ;
- la force de Coriolis, engendrée par la rotation de la planète ;
- Les forces de frottement, provoquées par la topographie et les rencontres entre les différentes masses d'air.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent, à savoir : la technologie éolienne dont on décrira, dans ce chapitre, le contexte de la production de l'énergie électrique.

Nous procédons alors par émettre des généralités sur les différents types d'éoliennes en vue de pouvoir préciser le choix du type pour ainsi définir les principaux composants qui le constituent.

Suite à cette présentation sommaire, on essaiera de décrire le modèle de simulation développé dans ce travail en se focalisant sur la partie mécanique sans se soucier de la partie électrique.

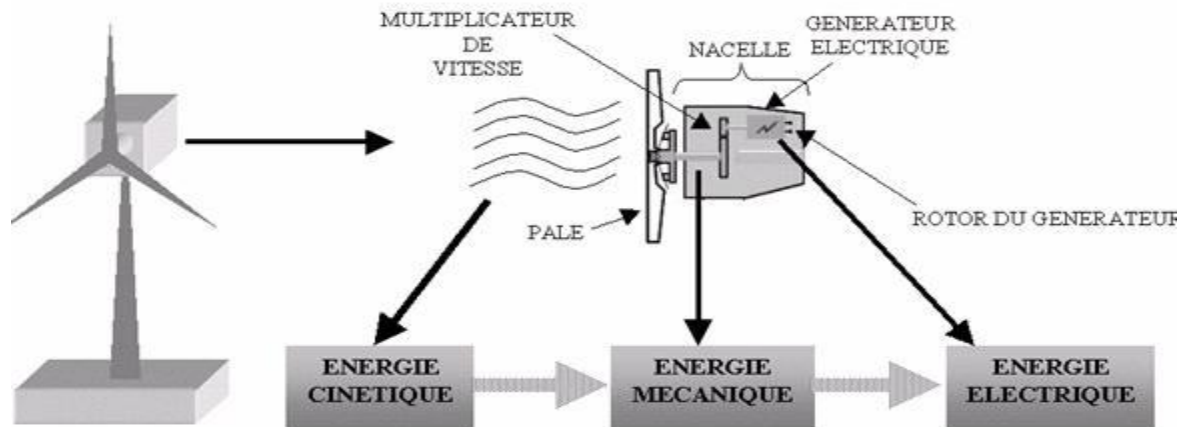
### I.2 Généralités sur les systèmes éoliens

#### I.2.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents, autour de notre planète ; il s'agit d'une énergie renouvelable de plus en plus utilisée pour produire une électricité verte à grande échelle.

Après l'énergie hydraulique, c'est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée, elle fournit 6% de l'électricité mondiale produite à partir d'énergies renouvelables. Elle est utilisée depuis longtemps : les moulins à vent permettaient ainsi de convertir l'énergie éolienne en énergie mécanique pour moudre le grain [1].

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (voir figure I.1), [2].



**Fig. I.1** – Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Parmi les avantages de cette source d'énergie, on peut citer :

- Le vent est disponible quelque soit la saison et dans beaucoup d'endroits.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable peu coûteuse qui ne nécessite aucun carburant pour fonctionner, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable dont le gisement est inépuisable à l'échelle de temps des civilisations humaines.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la fluctuation des prix du baril de pétrole.
- Le terrain où les éoliennes sont installées reste toujours exploitable pour les activités industrielle et agricole. L'installation peut être démantelée facilement.

- Le développement des éoliennes offshore présente un potentiel non négligeable.

Au-delà de ces avantages, des inconvénients non négligeables méritent d'être évoqués; en effet, l'énergie éolienne est une énergie intermittente dépendante de la présence ou non du vent, ce problème peut être en partie résolu grâce aux possibilités de stockage de l'énergie et à la répartition des parcs éoliens sur le territoire permettant d'obtenir une valeur moyenne de gisement éolien.

### I.2.2 Energie éolienne dans le monde

L'énergie éolienne est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante. En 2010, plus de 35000 MW de nouvelles capacités éoliennes ont été installées dans le monde. L'éolien représente 2.4% de la consommation totale d'électricité dans le monde et a attiré un total d'investissements de 65 milliards de dollars. Les experts du GWEC (Conseil mondial de l'énergie éolienne) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'énergie éolienne. La figure I.2 montre des statistiques réalisées par GWEC sur le développement des éoliennes dans le monde durant les deux dernières décennies [3].

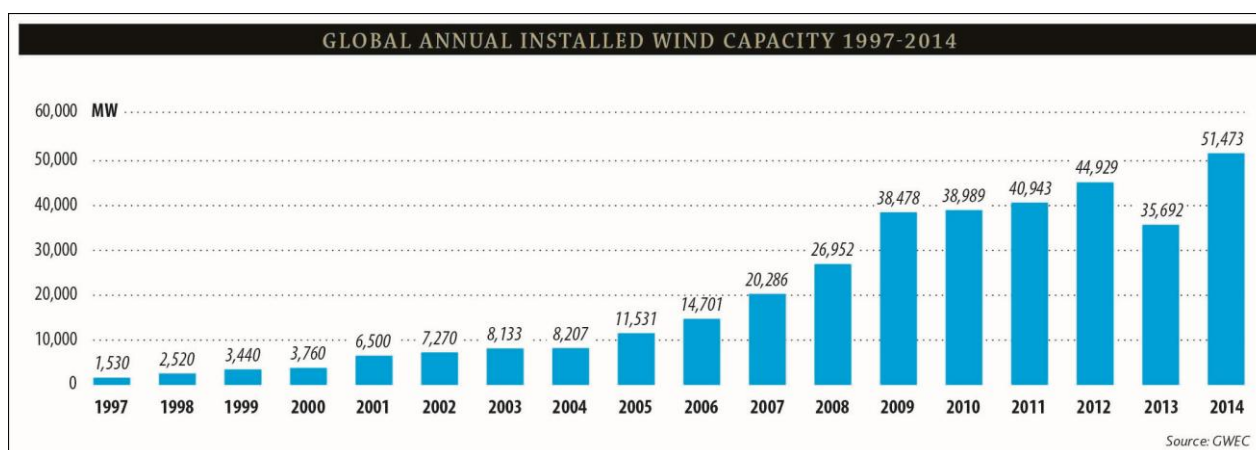
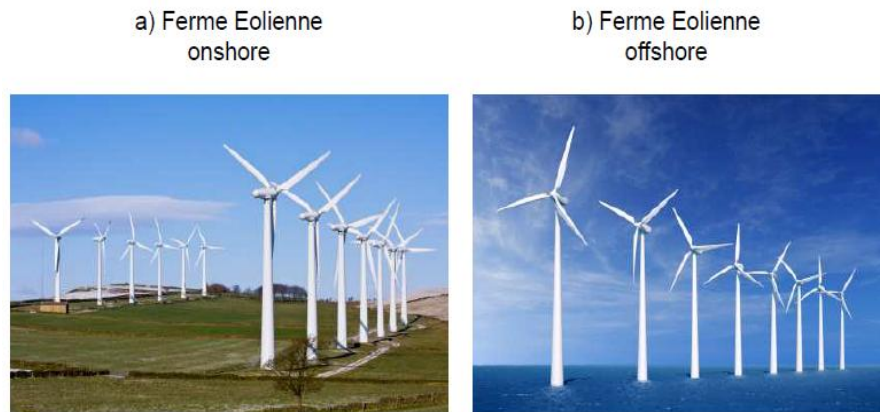


Fig. I.2 – Capacité éolienne installée dans le monde entre 1997 et 2014.

### I.2.3 Les différents types d'éoliennes

Une éolienne occupe une faible surface au sol. Ceci est un énorme avantage pour son installation qui perturbe peu les sites et permet de conserver des activités industrielles ou agricoles à proximité. Les éoliennes sont regroupées sous forme de fermes éoliennes (voir

figure I.3). Les installations peuvent être réalisées sur terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes offshore où la présence du vent est plus régulière ; avec ce dernier type d'installation, les nuisances sonores sont réduites et l'esthétique est améliorée [4].



**Fig. I.3** – Une ferme éolienne onshore et offshore

### I.2.3.1 Classification selon la taille

On définit différentes classes de taille d'éoliennes. En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne ; en effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours en fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor.

Dans le tableau suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeurs de puissances associées.

<b><i>Echelle</i></b>	<b><i>Diamètre du rotor [m]</i></b>	<b><i>Puissance délivrée [MW]</i></b>
Petite	Moins de 12	Moins de 40 KW
Moyenne	12 à 45	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 et plus	1 MW et plus

**Tableau. I-1** – Classification des turbines éoliennes.

### I.2.3.2 Classification selon le type d'orientation

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation, à savoir : les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical. Ces dernières peuvent

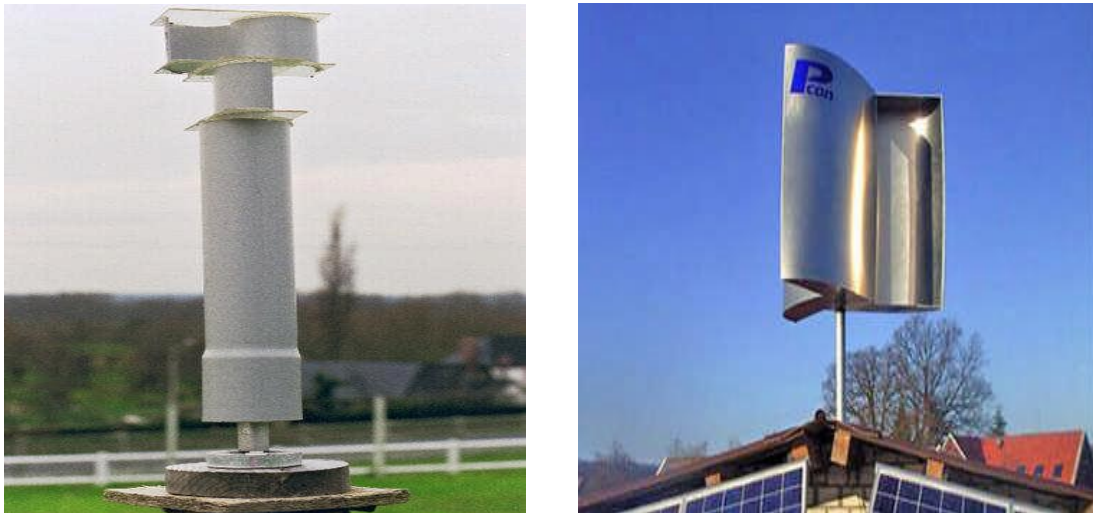
être classées en deux structures très répandues qu'on présentera ultérieurement. Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice.

*a) Eoliennes à axe vertical*

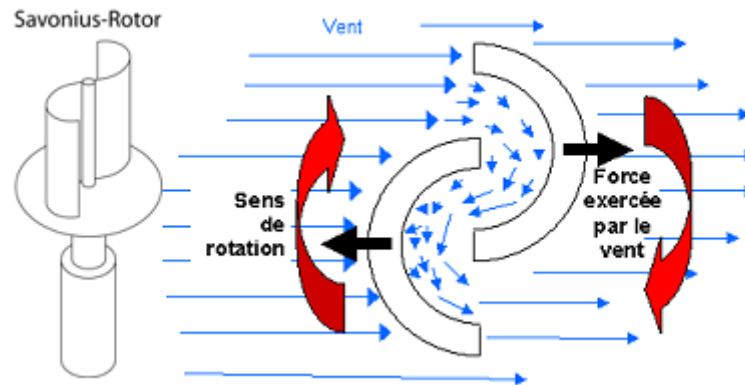
Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures développées pour produire de l'électricité et possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ce qui facilite leur accessibilité. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Les deux structures très répandues que nous avons évoquées sont :

– L'éolienne **Savonius** comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre (voire figure I.4). Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner ; l'éolienne est simple à fabriquer et démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s. Le principe de fonctionnement est donné par un schéma (voir figure I.5) [5].



**Fig. I.4** – Eoliennes à axe vertical de type Savonius.



**Fig. I.5** – Schéma de principe du rotor de Savonius.

– L'éolienne **Darrius** (voir figure I.6) a été inventée par le français **Darrius** ; cette structure est celle d'un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité et réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220km/h et quelle que soit leur direction, mais demeure peu fiable à cause de son démarrage (elle ne démarre pas seule). Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet.



**Fig. I.6** – Eoliennes à axe vertical de type Darrius.



**b) Éoliennes à axe horizontal**

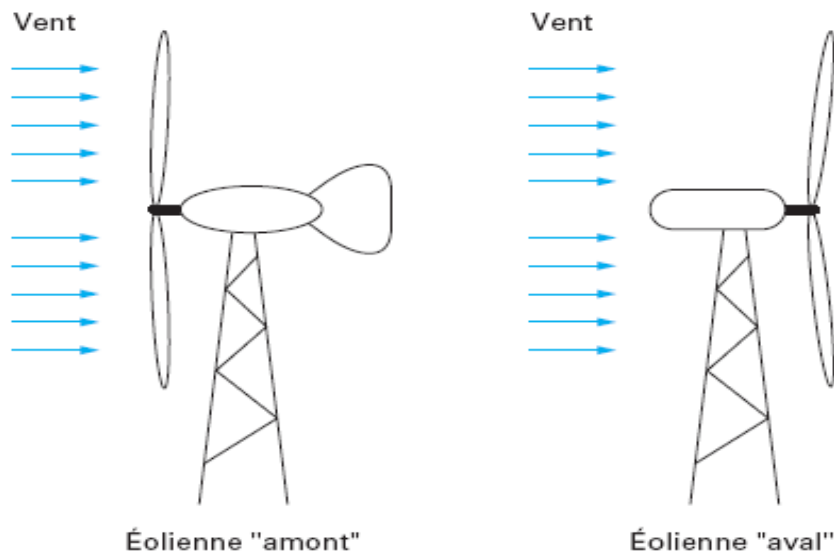
Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent (voir figure I.7). Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction du vent et constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est bi ou tripale, ou multipales pour le pompage de l'eau. Les très répandues sont les tripales car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées et constituent la catégorie des éolienne en vogue car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important. De ce fait, notre travail s'est porté sur l'étude des éoliennes à axe horizontal.



**Fig. I.7** – Moulin à vent et éolienne à axe horizontal.

- Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal comme le montre la figure I.8 :
- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle (*hélice au vent*).
  - **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle (*hélice sous le vent*).

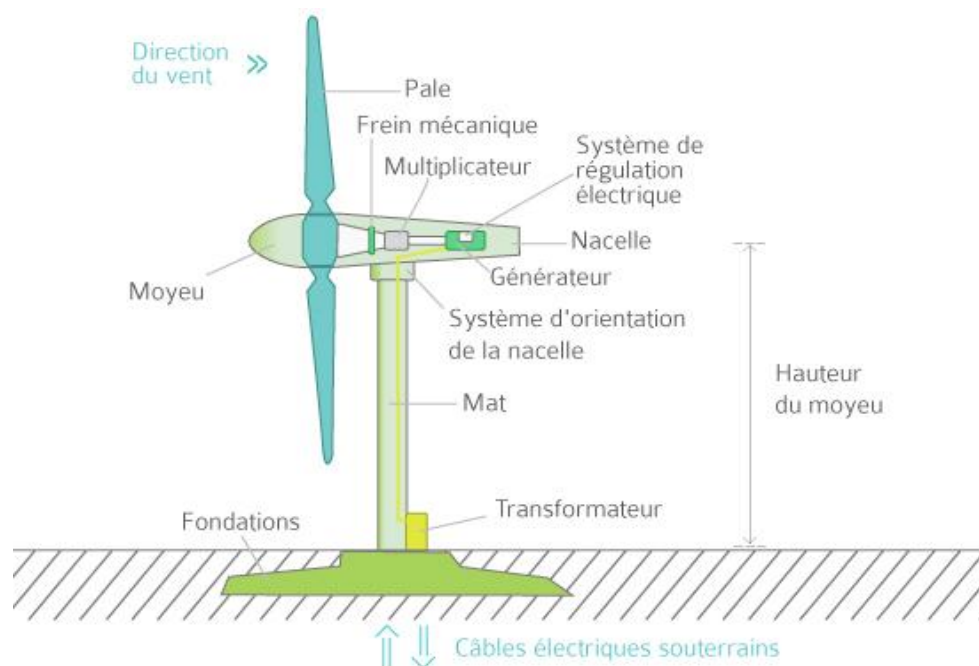




**Fig. I.8** – Schéma représentant d'une éolienne à axe horizontal : amont et aval.

#### I.2.4 Conception d'une éolienne a axe horizontal

L'éolienne est généralement bâtie de trois éléments principaux : la tour (ou le mât) et fondation, la nacelle et l'ensemble rotor-pales [6]. Cette configuration est représentée par la figure I.9.



**Fig. I.9** – Structure générale d'une éolienne à axe horizontal.

- *Le mât et fondation :*

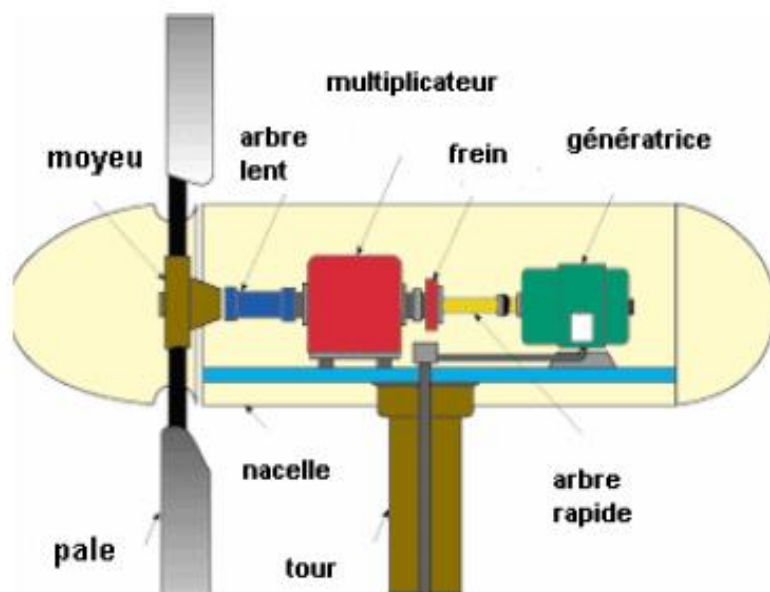
Ce sont les éléments qui supportent la nacelle et le rotor; ils doivent être capables de supporter les différentes contraintes dues aux conditions du site. Le mât permet d'élever l'hélice à une altitude adéquate, plus la tour est haute, plus les pales captent du vent.

- *Pales et rotor :*

Les pales captent l'énergie du vent et la transfèrent au rotor. Ce dernier est constitué de deux ou trois pales en général qui sont montées sur un moyeu.

- *La nacelle :*

C'est le coffret qui se trouve en haut de la tour. Il contient et protège les différents composants de l'éolienne en veillant au bon fonctionnement de la conversion de l'énergie mécanique en électricité. Le schéma détaillé de la nacelle de l'éolienne à axe horizontal est présenté par la figure I.10 [7].



**Fig. I.10** – Schéma de la nacelle.

- *L'arbre lent* : transmet l'énergie mécanique du moyeu au multiplicateur.

- *Multiplicateur* : est une boîte de vitesse. Il adapte la vitesse de rotation de la turbine (30 tours/minute maximum) au fonctionnement de la génératrice (plus de 1000 tours/minute).
- *Frein* : Il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance. Permet à l'éolienne de fonctionner en cas de vitesses des vents trop importantes qui pourraient l'endommager ou la rendre incontrôlable en réduisant la vitesse de rotation.
- *L'arbre rapide* : Relie le multiplicateur à la génératrice.
- *Génératrice* : Elle transforme l'énergie mécanique disponible sur l'arbre rapide en énergie électrique à la manière d'une dynamo de vélo. On utilise généralement la génératrice asynchrone ou synchrone.

On trouve aussi dans les éoliennes, des systèmes d'orientation des pales (Pitch control) d'autres pour l'orientation de la nacelle suivant la direction du vent (Yaw control). De nombreux capteurs sont installés (Ex : anémomètre) mais aussi des systèmes de sécurités (Ex : frein hydraulique). Ces composants se diffèrent d'une machine à une autre.

### I.2.5 La chaîne de transformation énergétique

En général, l'éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité [8]. Les différentes transformations sont illustrées par le schéma de la figure I.11.

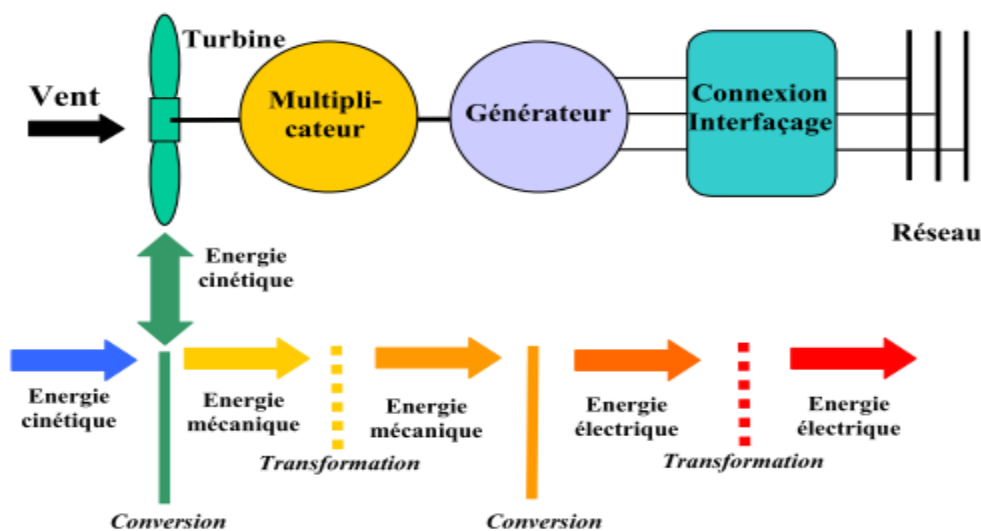


Fig. I.11 – Chaîne de transformation énergétique.

**a) La transformation de l'énergie par les pales**

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion. La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

**b) L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur**

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité, c'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

**c) La production d'électricité par le générateur**

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur dont le rotor tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.

**d) Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur**

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20000 Volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, ainsi elle sera, soit stockée dans des accumulateurs, ou bien distribuée par le biais d'un réseau électrique où elle pourra alimenter des charges isolées.

**I.2.6 Aérodynamique****I.2.6.1 Loi de Betz [2]**

L'aérodynamique d'une turbine éolienne est en fait un terme désignant l'interaction entre le vent et le rotor de l'éolienne. La théorie du disque (voir figure I.12), sert à décrire la

---

caractéristique aérodynamique d'une telle turbine, où nous avons représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé en amont de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit  $\frac{V_1+V_2}{2}$ . La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

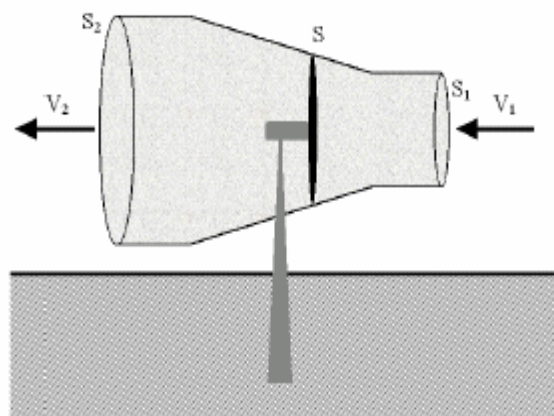
$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I.1})$$

La puissance  $P_{aéro}$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{aéro} = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.2})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (I.2) on aura :

$$P_{aéro} = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.3})$$



**Fig. I.12** – Tube de courant autour d'une éolienne.

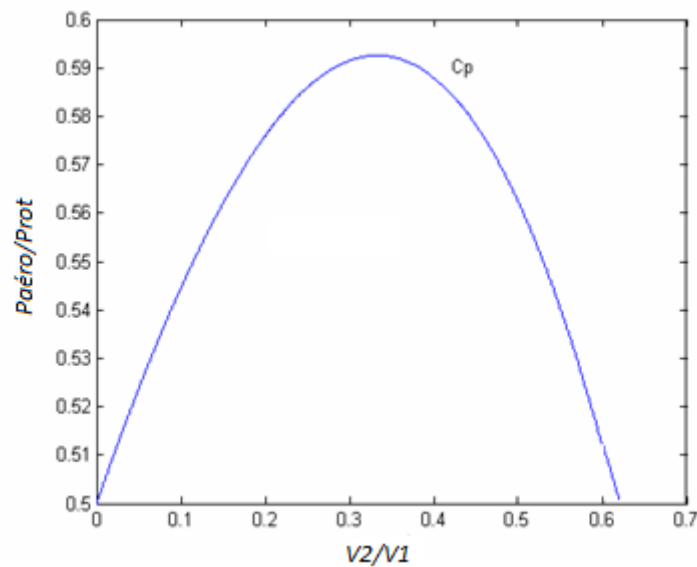
Un vent théorique non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{rot}$  correspondante serait alors :

$$P_{rot} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (I.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_{aéro}}{P_{rot}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (I.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (voir figure I.13), on s'aperçoit que le ratio  $P_{aéro}/P_{rot}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $16/27$  soit  $0.59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de **Betz** qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.



**Fig. I.13** – coefficient de puissance.

La figure I.14 donne un aperçu sur les coefficients de puissance  $C_p$  habituels en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  pour différents types d'éoliennes.

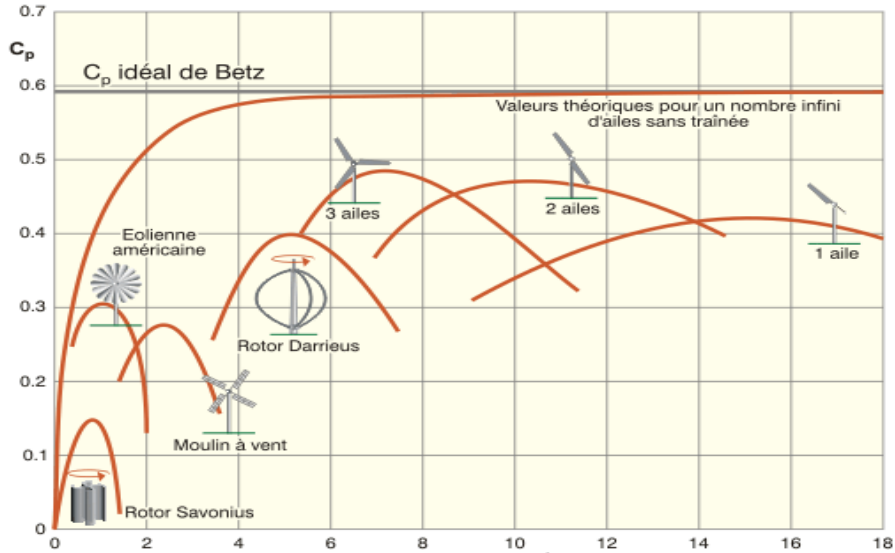


Fig. I.14 – coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes.

### I.2.7 Stratégies de commande de la turbine

La caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones [9] (figure I.15).

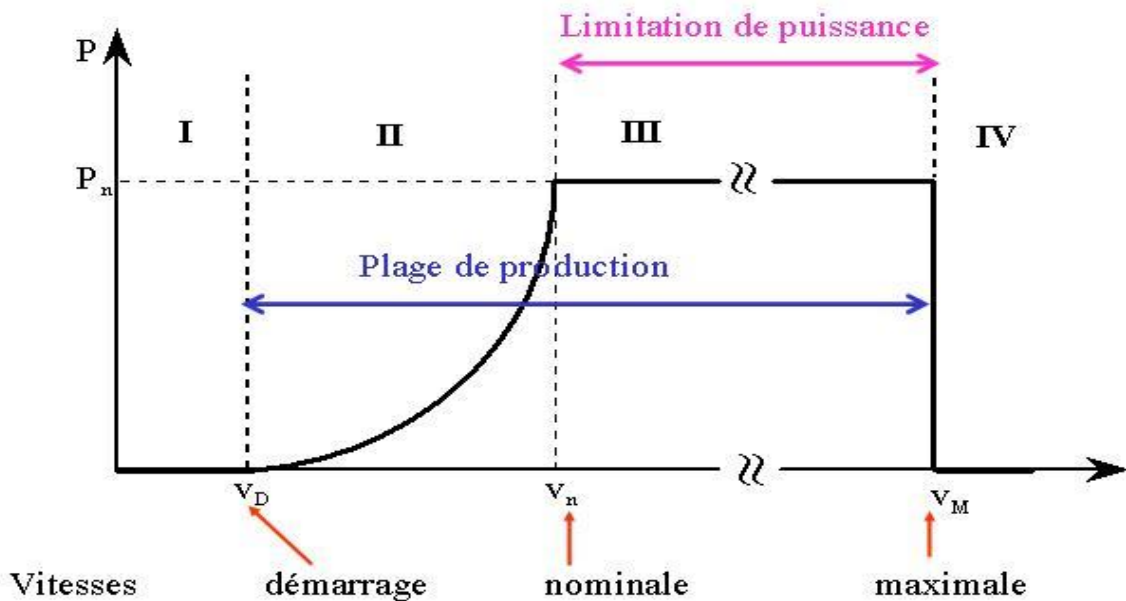


Fig. I.15 – Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne.

Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieur à une certaine vitesse, avant cette zone le vent est très faible pour faire tourner l'éolienne.

Zone 2 : Dans cette zone, le vent fait tourner la turbine à des vitesses différentes mais au-dessous de la vitesse nominale, le but de la commande dans ce cas est d'adapter la vitesse de la génératrice afin de maintenir le rapport de la vitesse spécifique à sa valeur optimale pour extraire le maximum de la puissance, la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Zone 3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante, dans cette zone la puissance de la génératrice atteint des valeurs très importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale  $P_n$ .

Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale  $P_n$  une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control. Au-delà de la vitesse  $V_M$  un dispositif d'urgence est actionné afin de manière à éviter une rupture mécanique, notre travail tournera particulièrement autour de la zone 2.

### **I.3 Modélisation et simulation d'une éolienne à deux masses**

#### **I.3.1 Présentation du modèle de l'aérogénérateur**

Dans la littérature, l'éolienne est présentée par la modélisation de la partie mécanique [7], [11] ou par celle de la partie électrique [7], [10] ; dans le cas de notre travail, nous nous intéresserons à la modélisation de la partie mécanique d'une éolienne à axe horizontal comme il a été mentionné précédemment.

L'éolienne est présentée par le modèle à deux masses, pour le dispositif d'entraînement, qui est très usité. Le modèle est illustré par la figure (I.16) [7], [12] puis une liste de symboles pour ce schéma est donnée par le tableau (I.2).



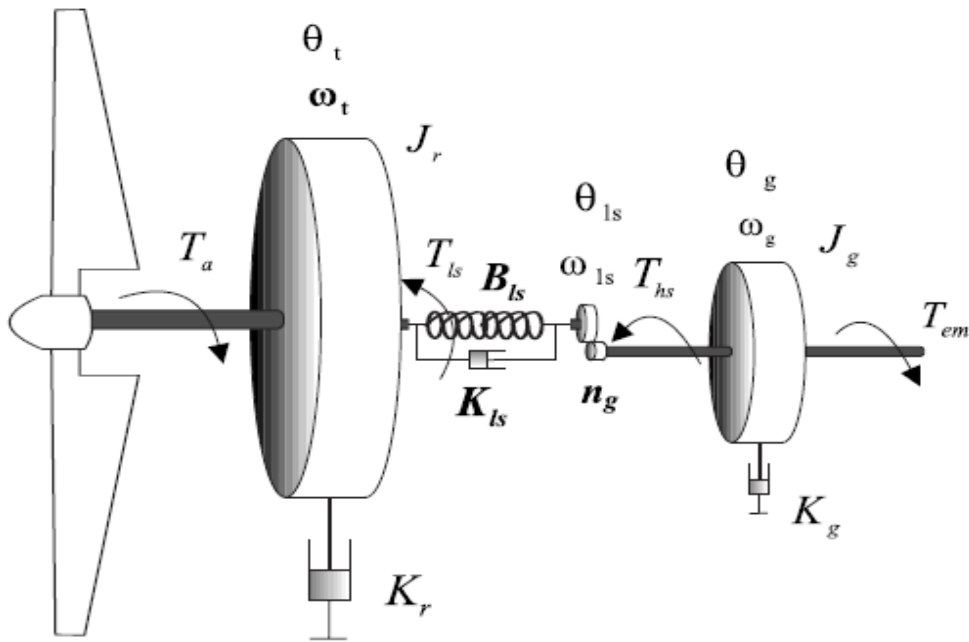


Fig. I.16 – Schéma du dispositif d'entraînement à deux masses.

Symbole	Signification	Unité
$J_r$	inertie des masses du côté du rotor	[kg.m <sup>2</sup> ]
$J_g$	inertie des masses du côté de la génératrice	[kg.m <sup>2</sup> ]
$K_{ls}$	coefficient de frottements sur l'arbre lent	[Nm/rad/s]
$K_r$	coefficient de frottements externes du rotor	[Nm/rad/s]
$K_g$	coefficient de frottements externes de la génératrice	[Nm/rad/s]
$B_{ls}$	coefficient de torsion sur l'arbre lent	[Nm/rad]
$T_{ls}$	couple de l'arbre lent	[Nm]
$T_{hs}$	couple de l'arbre rapide	[Nm]
$T_{em}$	couple électromagnétique de la génératrice	[Nm]
$\omega_t$	vitesse du rotor	[rad/s]
$\omega_{ls}$	vitesse de l'arbre lent	[rad/s]
$\omega_g$	vitesse de la génératrice	[rad/s]
$n_g$	rapport de transmission du multiplicateur	Sans unité

Tableau. I-2 – Liste des symboles.

### I.3.2 Hypothèses simplificatrices du modèle

Afin d'aboutir à une représentation simple, il est nécessaire d'introduire quelques hypothèses simplificatrices. En effet, notre modèle repose sur les hypothèses suivantes [7] :

Les deux pales sont considérées de conception identique, elles possèdent alors la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air.

Les modes flexibles des pales sont supposés suffisamment élevés pour être négligés, et tous les autres modes flexibles sont localisés dans l'élément flexible de l'arbre lent, par contre, l'arbre rapide est considérée infiniment rigide.

Les inerties du multiplicateur et de l'arbre lent sont intégrées à celle du rotor. L'ensemble est représenté par  $J_r$ .

Concernant l'inertie du moyeu, elle peut être négligée car elle représente 1% de l'inertie totale de la turbine. L'inertie de l'arbre rapide associé à la génératrice est représentée par  $J_g$ .

Les torsions des pales, moyeu, multiplicateur et de l'arbre lent sont regroupées dans un coefficient d'élasticité global représenté sur l'arbre lent  $B_{ls}$ .

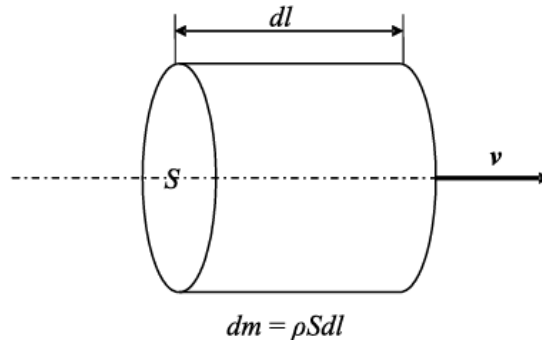
Les frottements visqueux sur les roulements du dispositif d'entraînement sont pris en compte par les coefficients  $K_r$  et  $K_g$ .

### I.3.3 Aérodynamique du modèle

#### I.3.3.1 Puissance aérodynamique

La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales, donc au carré du diamètre de son rotor.

Soit la masse d'air homogène  $dm$  de densité  $\rho$ , contenue dans un cylindre horizontal, dont l'une des sections  $S$  est le disque rotorique (surface balayée par le rotor), de longueur  $dl$ , incidente sur le rotor à une vitesse  $v$  (figure I.17).



**Fig. I.17** – Colonne d'air incidente sur le rotor.

Reprenons l'équation (I.5) du ratio mentionnée en première partie. Ce ratio qui est le coefficient de puissance qui est obtenu par la loi de **Betz** s'exprime par l'équation suivante

$$C_p = \frac{P_{aéro}}{P_{rot}} = \frac{P_{aéro}}{\frac{1}{2}\rho S v^3} \quad (I.6)$$

D'où :

$$P_{aéro} = \frac{1}{2}\rho S v^3 C_p \quad \text{où } S = \pi R^2 \quad (I.7)$$

Tels que,  $P_{aéro}$  est la puissance aérodynamique de la turbine,  $S$  et  $R$  étant successivement la surface et le rayon de l'aire balayée par le rotor,  $\rho$  est la masse volumique de l'air, [5].

### I.3.3.2 Coefficient de puissance aérodynamique

Le coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$ , dépend du nombre de pales du rotor et de leurs formes géométriques et aérodynamiques (longueur, profil des sections). Celles-ci sont conçues en fonction des caractéristiques désirées, puissance nominale, type de régulation et du type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable). Le paramètre  $C_p$  est sans dimension, il est généralement obtenu par des essais en soufflerie, il se présente sous la forme d'une fonction non linéaire de l'angle de calage  $\beta$  et de la vitesse spécifique  $\lambda$  qu'on définit comme suit

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (I.8)$$

$\omega_t R$  Désigne la vitesse tangentielle au bout de la pale.

La limite supérieure théorique du coefficient de puissance  $C_{p\_max}(\lambda, \beta)$  est fournie par la loi de **Betz** [2], [7].

$$C_{p\_max}(\lambda, \beta) = \frac{16}{27} \simeq 0.5926 \quad (\text{I.9})$$

Une expression analytique de  $C_p(\lambda)$  pour différentes valeurs de  $\beta$  peut être calculée. Pour un angle de calage  $\beta$  donné, l'expression analytique généralement utilisée est une régression polynômiale [13]

$$C_p(\lambda) = \sum_{i=0}^n a_i \lambda^i \quad (\text{I.10})$$

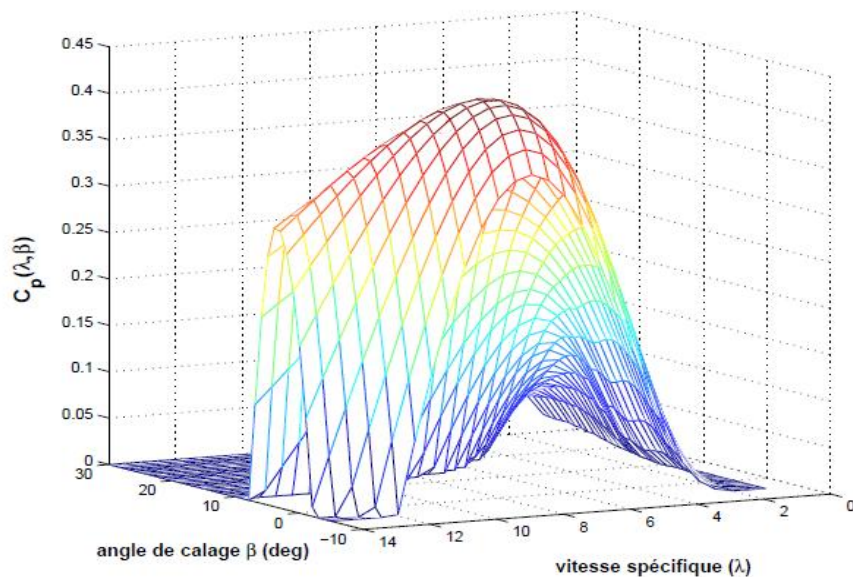
Le coefficient de puissance que nous avons utilisé a pour expression [9]

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( c_2 \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3\beta - c_4 \right) e^{\frac{-\beta}{10}} c_5 \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) + c_6 \lambda \quad (\text{I.11})$$

Où

$$c_1 = 0.5109, \quad c_2 = 116, \quad c_3 = 0.4, \quad c_4 = 5, \quad c_5 = 21, \quad c_6 = 0.0068.$$

$C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure I.18 représente le coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$  calculé à partir de l'équation (I.11), en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  pour différents angles d'inclinaison des pales  $\beta$ .



**Fig. I.18** – Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\beta$  et  $\lambda$ .

### I.3.3.3 Couple aérodynamique

La transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique se traduit par le couple aérodynamique  $T_a$  qui fait tourner le rotor à une vitesse  $\omega_t$ . En termes de puissance on peut écrire

$$P_{aéro} = T_a \omega_t$$

Ou encore

$$T_a = \frac{P_{aéro}}{\omega_t} \quad (I.12)$$

En substituant l'expression (I.7) de  $P_{aéro}$  dans (I.11) et en tenant compte de (I.8), on peut réécrire l'expression du couple aérodynamique sous la forme

$$T_a = \frac{\frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (I.13)$$

Ou encore

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_q(\lambda, \beta) \quad (I.14)$$

Où

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (I.15)$$

### I.3.4 Dynamique du modèle

Partant de l'hypothèse que  $J_r$  présente l'inertie de la première masse comprenant l'inertie du rotor, l'inertie de l'arbre lent et celle du multiplicateur.

La dynamique du rotor est caractérisée par une équation différentielle du premier ordre

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - K_r \omega_t \quad (I.16)$$

Le couple de l'arbre lent  $T_{ls}$  résulte des effets de frottements et de torsion générés par les écarts entre la vitesse angulaire du rotor  $\omega_t$  et celle de l'arbre lent  $\omega_{ls}$  d'une part et entre la position angulaire  $\theta_t$  et celle de l'arbre lent  $\theta_{ls}$  d'autre part

$$T_{ls} = B_{ls}(\theta_t - \theta_{ls}) + K_{ls}(\omega_t - \omega_{ls}) \quad (I.17)$$

Le couple et la vitesse de cet arbre sont transmis par un multiplicateur de vitesse  $n_g$  pour produire un couple sur l'arbre rapide,

$$T_{hs} = \frac{T_{ls}}{n_g} \quad (\text{I.18})$$

car la vitesse et la position angulaire du générateur sont

$$\begin{cases} \theta_g = n_g \theta_{ls} \\ \omega_g = n_g \omega_{ls} \end{cases} \quad (\text{I.19})$$

Pour un multiplicateur idéal, on aura le rapport de transmission

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \quad (\text{I.20})$$

Le générateur est entraîné par le couple de l'arbre rapide  $T_{hs}$  et freiné par le couple électromagnétique  $T_{em}$  et les frottements visqueux. Sa dynamique est

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \quad (\text{I.21})$$

En transformant les équations (I.16) et (I.21) respectivement dans le domaine de **Laplace** nous aurons

$$\omega_t = \frac{1}{J_r s + K_r} (T_a - T_{ls}) \quad (\text{I.22})$$

$$\omega_g = \frac{1}{J_g s + K_g} (T_{hs} - T_{em}) \quad (\text{I.23})$$

Les formules démontrées précédemment nous ont permis de construire un schéma bloc de la turbine éolienne utilisée (voir figure I.19).

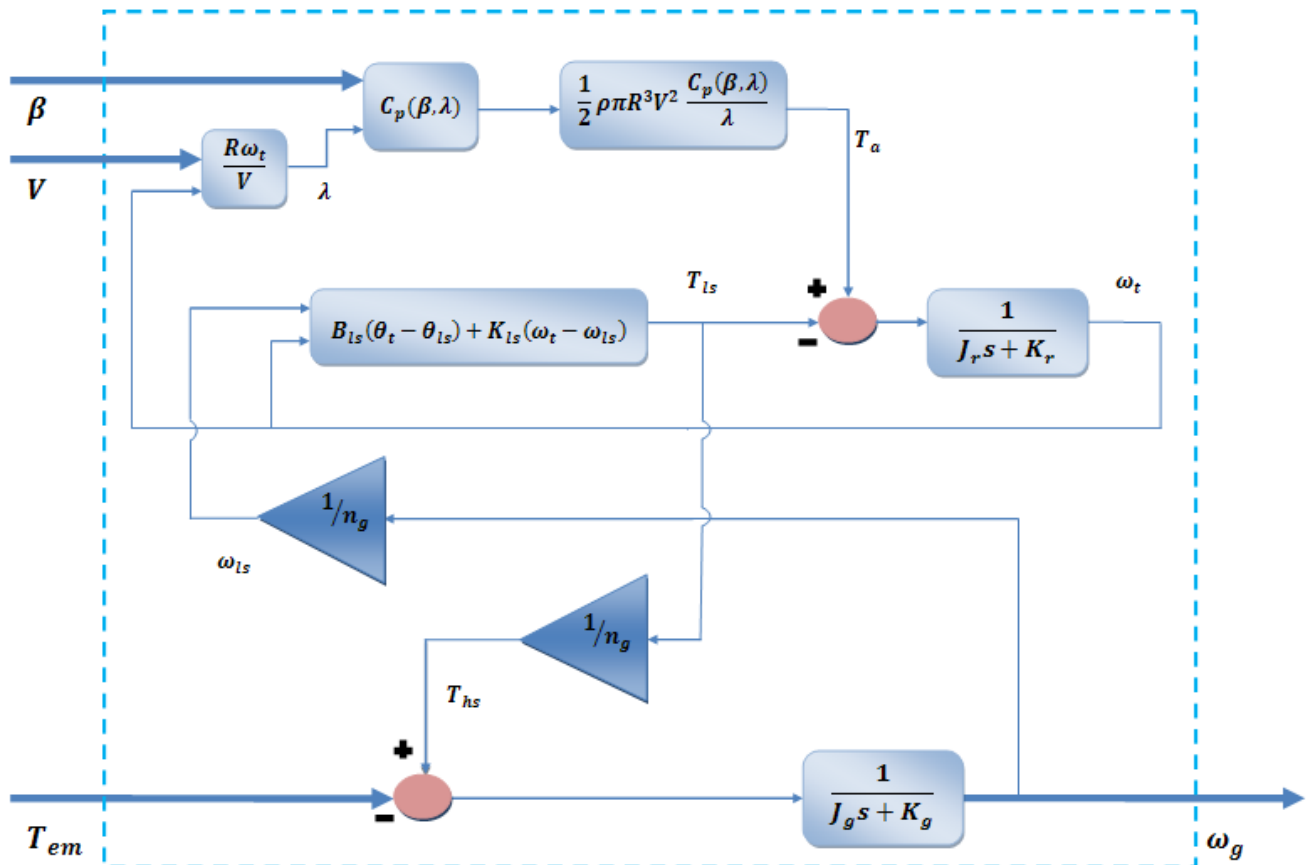


Fig. I.19 – Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

Le modèle élaboré est implémenté sous un bloc Simulink de Matlab. Ce modèle est constitué de trois entrées et une sortie. Les entrées sont le couple électromagnétique  $T_{em}$ , l'angle de calage (pitch)  $\beta$  et la vitesse du vent  $V$  qui est considérée comme perturbation mais utilisée aussi pour calculer les références. La sortie du modèle est la vitesse de la génératrice  $\omega_g$ .

Le modèle de la simulation est basé sur des paramètres réels d'une éolienne CART (Control Advanced Research Turbine) dont les caractéristiques sont exposées dans l'annexe [12].

Le schéma de la figure I.20 représente le bloc Simulink de la turbine éolienne [7].

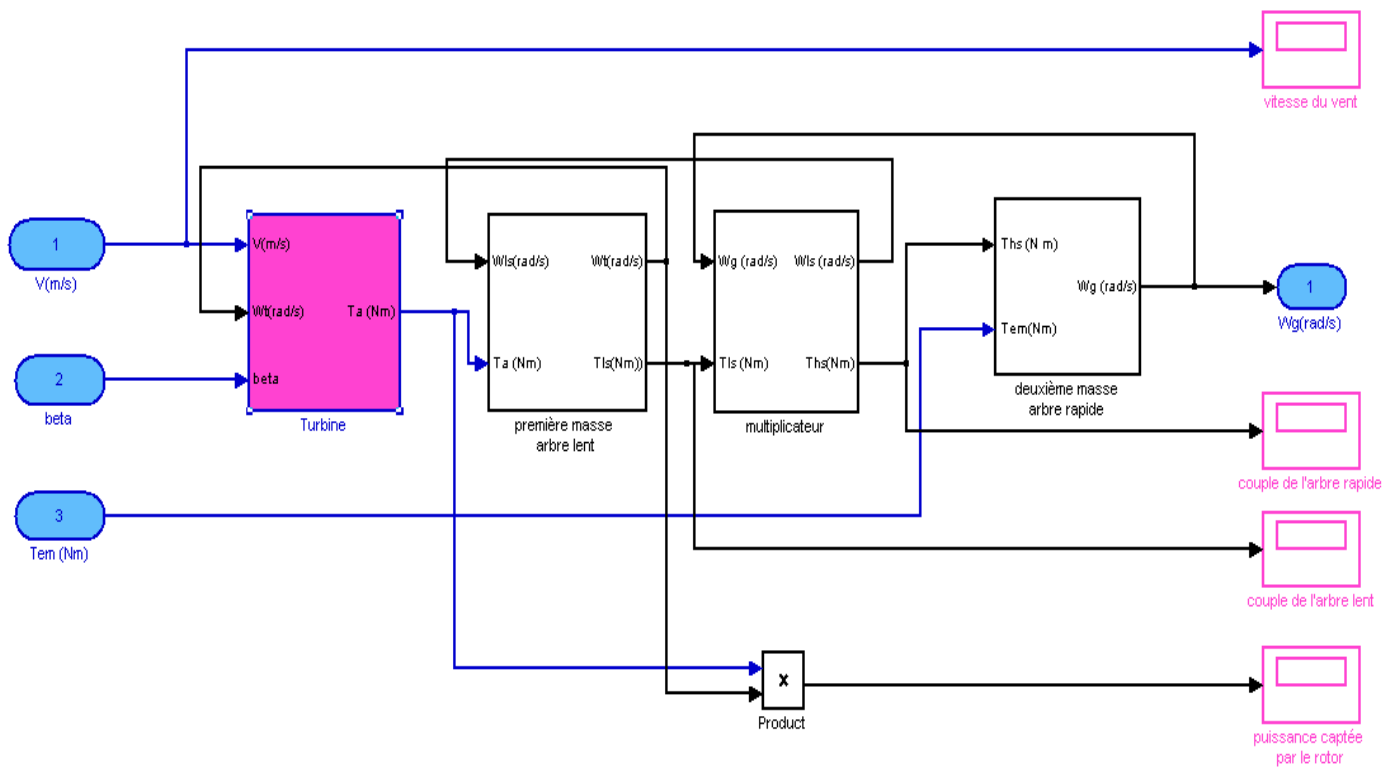


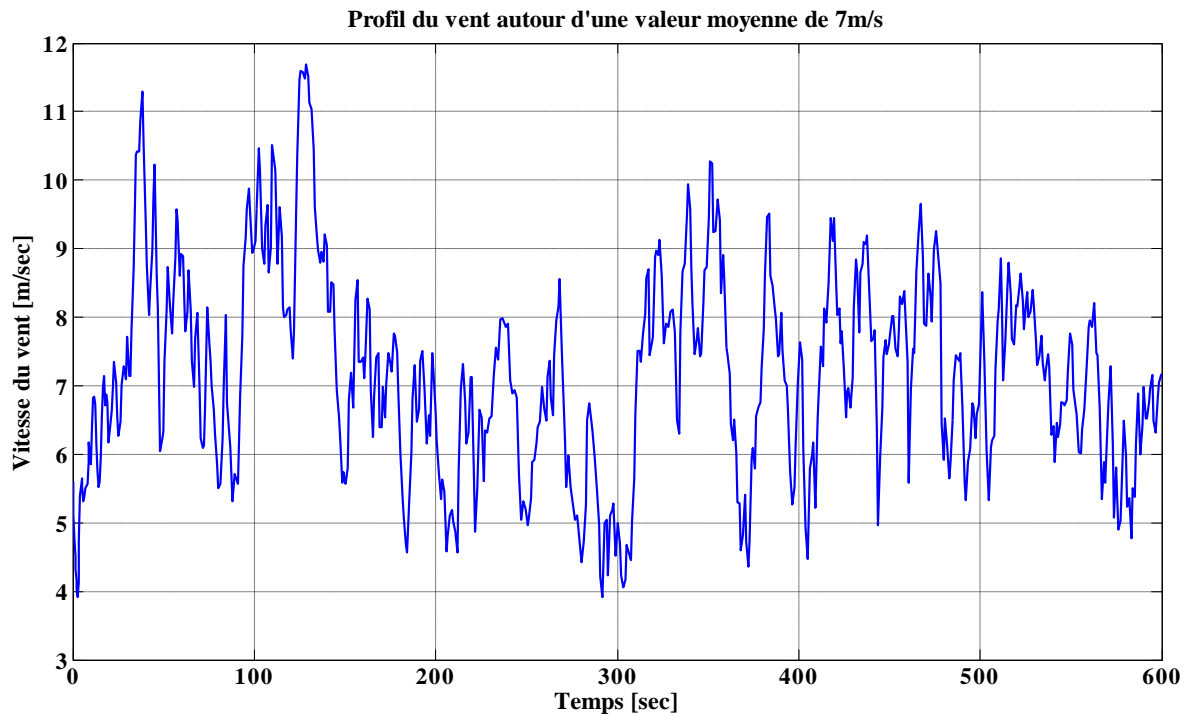
Fig. I.20 – Bloc Simulink de la turbine éolienne.

### I.3.5 Simulation du modèle

#### I.3.5.1 Profil du vent

Pour effectuer les différentes simulations de notre système, nous avons besoin d'un profil de vent reflétant au maximum la réalité de ce qu'on peut trouver sur un site éolien. Afin de concrétiser tout cela, on a utilisé un tableau contenant des valeurs du vent prélevées autour d'une valeur moyenne de 7m/sec. Prenant en compte l'hypothèse que la vitesse du vent change chaque une dizaine de minute, les valeurs du vent utilisées sont alors mesurées chaque dix minute. Le profil du vent obtenu après simulation est illustré par la figure I.21.





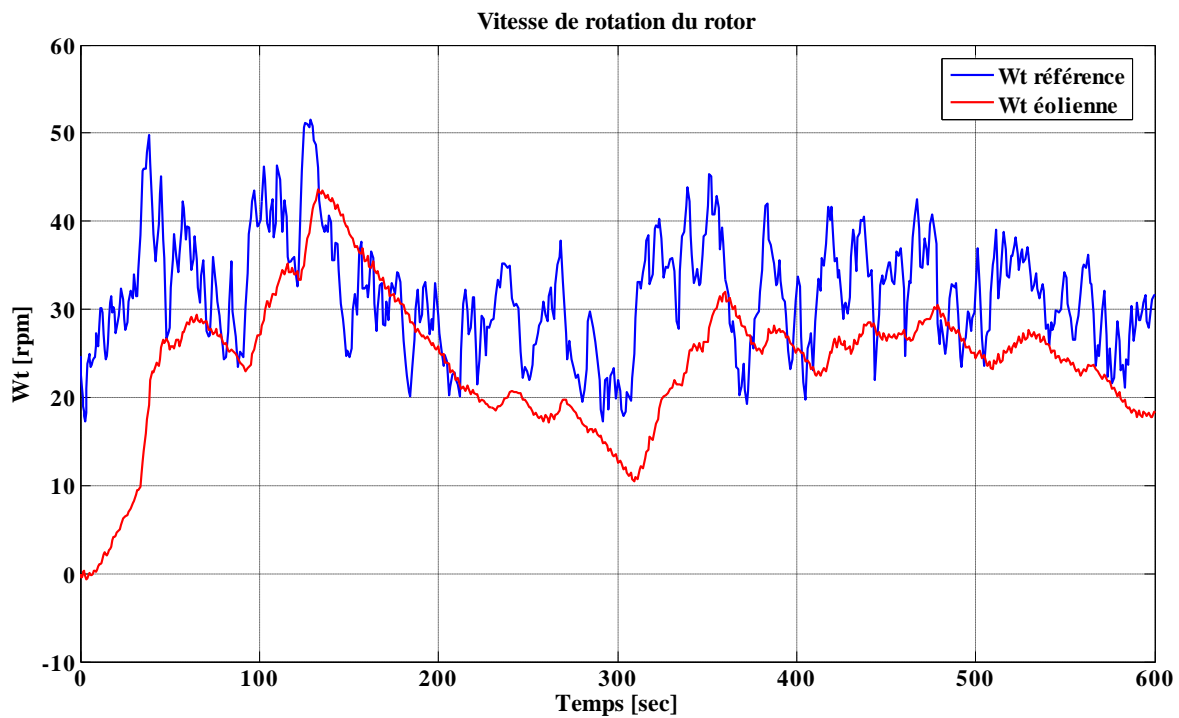
**Fig. I.21** – Profil du vent en une vitesse moyenne de 7 m/sec.

### I.3.5.2 Résultats de simulation

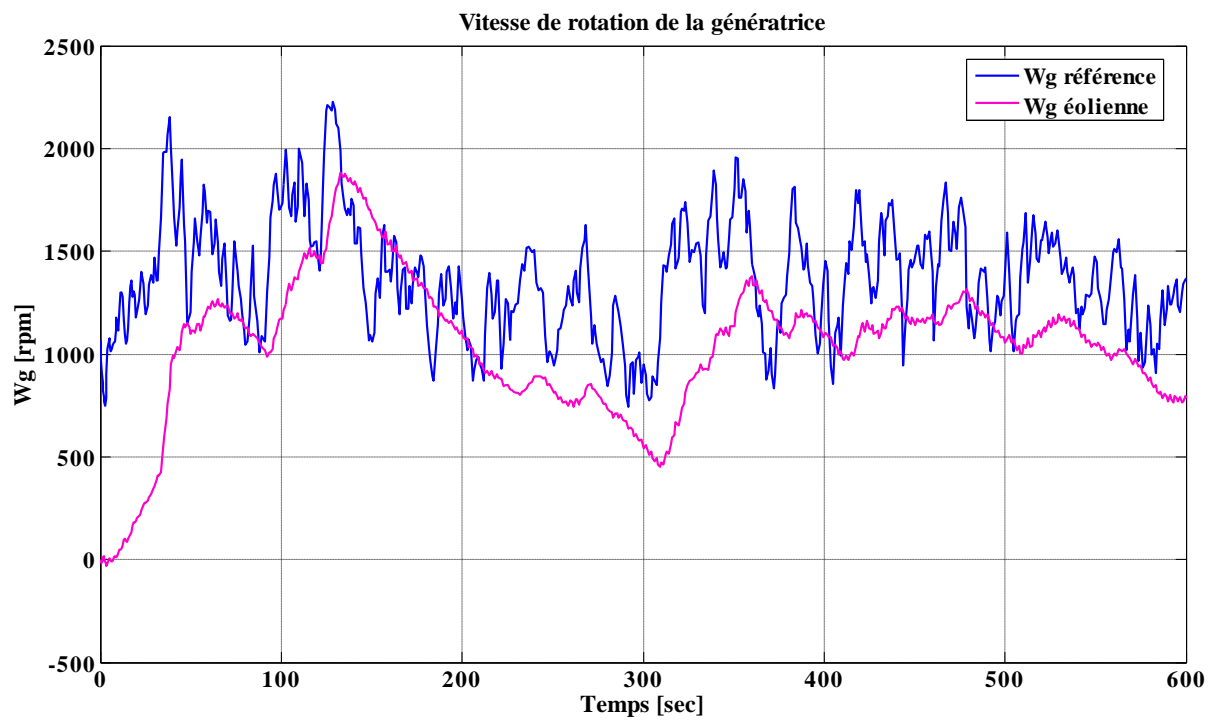
La simulation du bloc Simulink de la figure I.20 a été faite pour une valeur de couple électromagnétique  $T_{em} = 162 \text{ Nm}$ , un angle de calage  $\beta = 2^\circ$ , un profil du vent correspondant à celui de la figure I.21 et de valeurs des paramètres de la turbine présentés dans l'annexe. Nous montrerons dans les figures qui suivent les résultats de la simulation faite en boucle ouverte.

La figure I.22 présente le tracé de la vitesse de rotation du rotor  $\omega_t$  obtenue comme sortie du modèle de simulation ainsi que le tracé de  $\omega_{t\_référence}$  qui représente la vitesse de rotation désirée.

Quant à la figure I.23, elle nous donne le tracé de la vitesse désirée, de rotation de la génératrice et celle obtenue par le modèle de simulation.



**Fig. I.22** – Allure de la vitesse de rotation du rotor.



**Fig. I.23** – Allure de la vitesse de rotation de la génératrice.

Maintenant, nous nous penchons du côté puissance où nous donnerons l'allure de la puissance mécanique délivrée par le modèle de la génératrice conçue. La figure I.24 montre la puissance mécanique de référence, de la génératrice, ainsi que celle du modèle étudié.

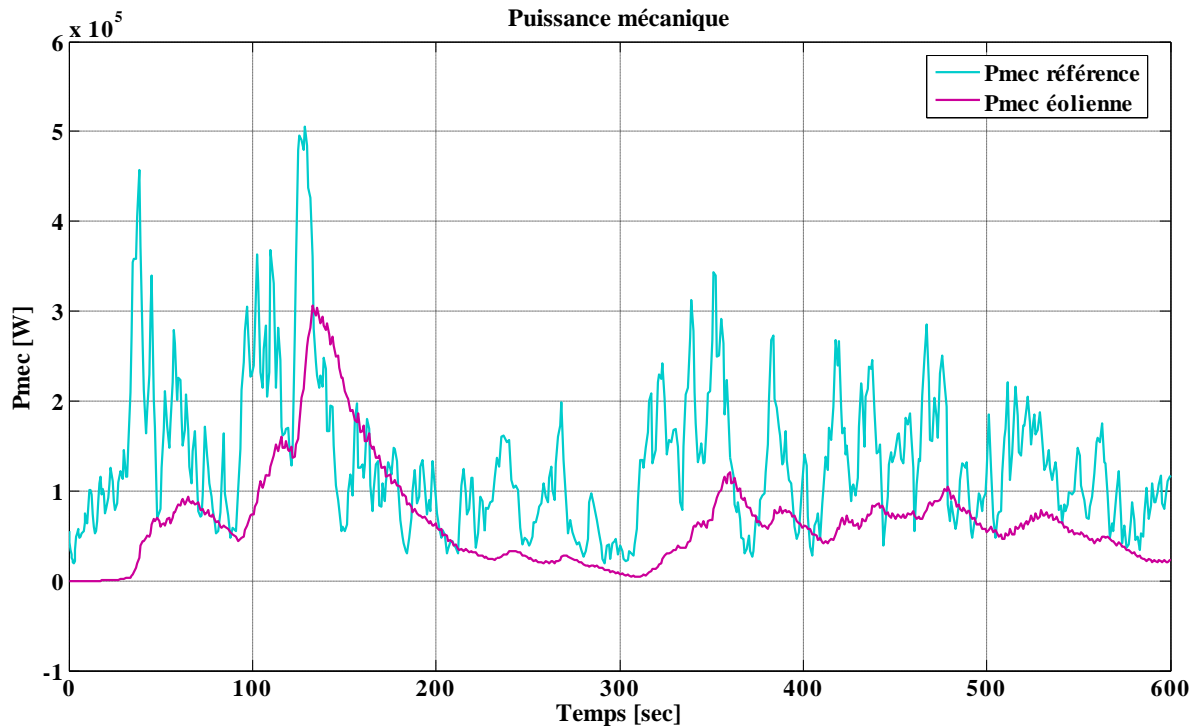


Fig. I.24 – Evaluation de la puissance mécanique.

### I.3.5.3 Discussion des résultats obtenus

D'après les trois dernières figures (I.22, I.23 et I.24), on constate que l'objectif de poursuite de la référence liée à la vitesse du vent fictif  $V$  n'est pas atteint, citons l'écart considérable entre la puissance mécanique fournie par la turbine et la puissance de référence d'où la nécessité d'élargir l'intervalle de fonctionnement du vent pour maximiser la production de l'énergie en dessous de la puissance nominale.

Il existe différentes techniques pour minimiser les écarts constatés pour allier la sortie du système à la référence, comme la commande à base de réseau de neurones ou la commande adaptative ou par traitement de signal. De plus, ces méthodes assurent à la fois la stabilité et la robustesse du système.

Dans les chapitres qui suivent, notre étude se focalisera sur la détection et l'isolation de défauts dans un tel système éolien où nous parlerons sur le diagnostic en général.

## **I.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté tout d'abord des notions générales sur l'énergie et les différents types d'éoliennes. Ensuite nous nous sommes focalisés sur l'étude d'une éolienne à axe horizontal dont nous avons présenté les différents composants et caractéristiques qui la constituent.

De l'énergie cinétique du vent à l'énergie mécanique de la turbine, dans le but d'appréhender le fonctionnement des éoliennes, le mécanisme de fonctionnement a été étalé.

Dans la suite du chapitre, une modélisation de cette éolienne est présentée. Nous avons exposé le modèle mathématique associé, qui est issu des lois de la physique pour la partie mécanique et de la mécanique des fluides pour le comportement aérodynamique afin d'aboutir à un modèle global non linéaire à deux masses. Nous avons réalisé ce modèle sous un bloc Simulink/Matlab.

Enfin, nous avons réalisé une simulation en boucle ouverte du modèle pour un profil du vent autour d'une valeur moyenne de 7 m/sec et les résultats de simulation sont présentés et discutés.



## *Chapitre II*

# *Différentes méthodes de détection et de diagnostic*

## Chapitre II : Différentes méthodes de détection et de diagnostic

### II.1 Introduction

De manière générale, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom : FDI (Fault Detection and Isolation). Cette procédure nous permet d'avoir des informations sur l'apparition d'un défaut et sur sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70 [14], [15]. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications.

Ce chapitre résume un état de l'art sur le diagnostic. Après une présentation des concepts de base concernant les différentes notions et définitions utilisées en diagnostic et système de diagnostic général, nous abordons la détection et la localisation de défauts, la mise en œuvre des techniques de diagnostic appropriées et on termine par un exemple pratique.

### II.2 Les différentes notions utilisées en diagnostic

Afin de fixer une base commune sur le vocabulaire employé, il convient tout d'abord d'explicitier quelques définitions et concepts [16] [17]

- *Une anomalie* est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique.
- *Une défaillance* est une anomalie altérant ou empêchant l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir la fonction souhaitée. Une défaillance correspond à un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état. Par abus de langage, cet état de panne on pourra l'appeler mode de défaillance.
- *Une panne* est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
- *Un défaut* est une anomalie de comportement au sein du système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut. Il est donc clair qu'une défaillance conduit à un défaut. Mais un défaut n'induit pas nécessairement une défaillance. En

effet, le dispositif peut conserver son aptitude à accomplir sa tâche principale si les défauts n'ont pas d'impacts sur cette tâche. L'art du diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance à savoir la panne.

- **Une perturbation** consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, non ou mal représenté par un modèle de référence.
- **Un résidu** est un signal conçu pour être un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence.
- **Un symptôme** est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.
- **Le diagnostic** consiste à déterminer le type, la taille, le lieu et l'instant d'occurrence d'un défaut, il suit la détection de défauts et inclut l'isolation et l'identification.
- **La surveillance** est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement.
- **La supervision** est la surveillance d'un système physique et la prise de décision appropriée en vue de maintenir son opération de défauts.

### II.3 Classification des défauts

Les défauts affectent un système, ils sont classés selon leur emplacement, leur modélisation, et leurs caractéristiques temporelles

#### II.3.1 Emplacement

Les défauts apparaissent dans les différentes parties d'un système, ils sont classés selon leur emplacement en trois catégories, en l'occurrence :

### II.3.1.1 Les défauts capteurs

Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer.

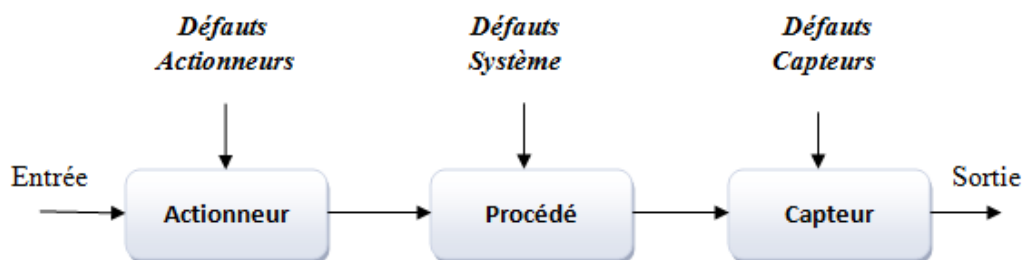
### II.3.1.2 Les défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale (défaillance) ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Un exemple de perte totale d'un actionneur est un actionneur qui est resté "collé" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissant de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine dégradation dans leur action sur le système. (Perte de puissance d'un moteur, fuite dans un vérin, . . .).

### II.3.1.3 Les défauts composants ou systèmes

Ce type de défaut provient du système lui-même ; bien souvent les défauts n'appartenant pas à un défaut capteur ou actionneur sont classés de manière arbitraire dans cette catégorie.

Néanmoins, un défaut composant résulte de la casse ou de l'altération d'un composant du système réduisant les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit.



**Fig. II.1** – Différents types de défauts agissant sur un système



### II.3.2 Modélisation

En plus, suivant la manière dont les défauts sont modélisés, ils sont classés en *additif* et *multiplicatif*, comme représenté sur la figure II.2

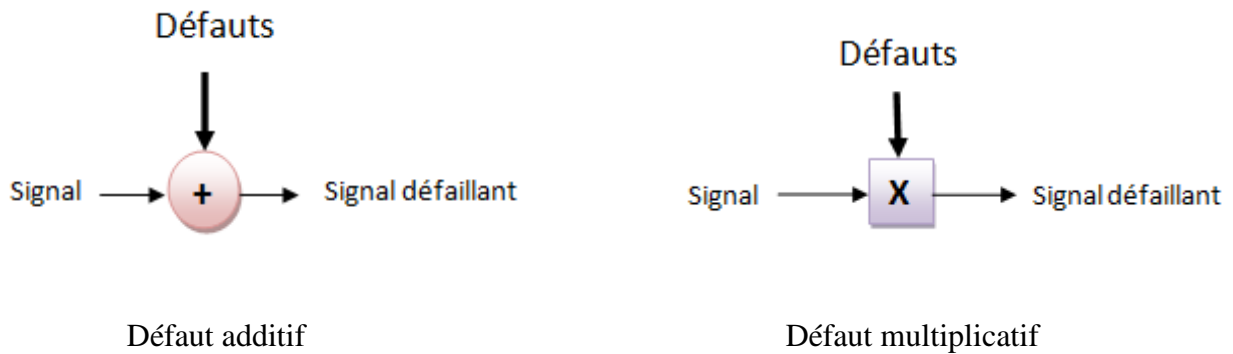


Fig. II.2 – Les défauts selon leur représentation

### II.3.3 Caractéristiques temporelles

Les défauts sont classés également selon leurs caractéristiques temporelles (voir la figure II.3) comme *brusque*, *progressif* et *intermittent*. Les défauts brusques (*biais*) se produisent instantanément souvent à cause de dommages matériels. Habituellement ils sont très graves car ils affectent les performances et/ou la stabilité du système commandé. Les défauts progressifs (*dérives*) représentent les changements lents des valeurs paramétriques. Souvent dus au vieillissement, ils sont plus difficiles à détecter en raison de leur dynamique lente, mais sont également moins graves. Les défauts intermittents (*valeurs aberrantes*) sont des défauts qui apparaissent et disparaissent à plusieurs reprises, par exemple à cause d'un câblage partiellement endommagé [18].

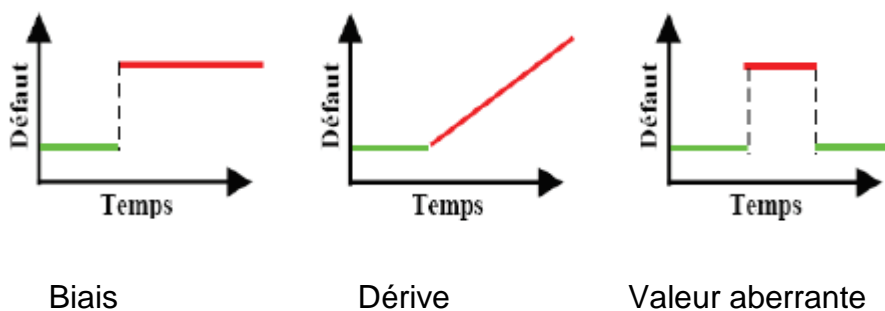


Fig. II.3 – Répartition des défauts selon le comportement temporel

## **II.4 Surveillance**

La surveillance d'un système repose sur l'observation des processus (ensemble de phénomènes organisés dans le temps) qui régissent le comportement du système ; Cependant, la surveillance n'a pas seulement pour fonction de centraliser et visualiser les informations. Elle a également pour fonction de déterminer le fonctionnement courant du système, de détecter le passage d'un fonctionnement normal vers un fonctionnement anormal et de caractériser ce changement de fonctionnement en déterminant sa cause ; cette seconde fonction est désignée par le terme diagnostic.

## **II.5 Diagnostic**

Le diagnostic consiste à détecter, localiser et éventuellement identifier les défauts qui affectent un système.

### **II.5.1 Détection**

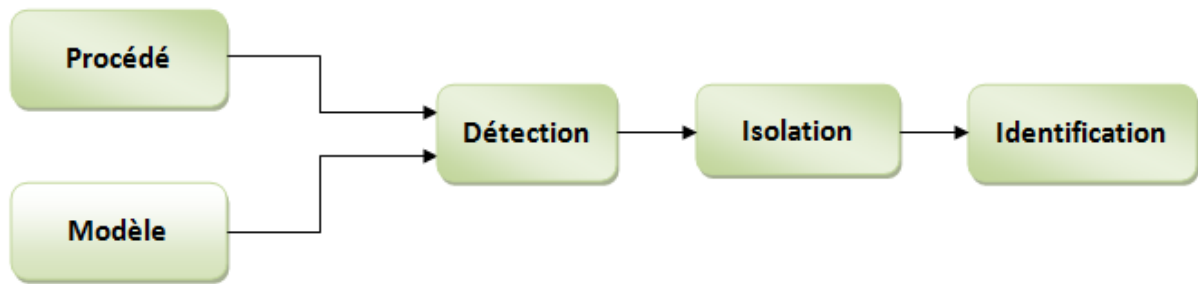
Premier niveau du diagnostic consiste à prendre une décision binaire : soit le système fonctionne correctement, soit une panne s'est produite. Le résultat de la procédure de détection est une alarme signifiant que le fonctionnement réel du système ne concorde plus avec le modèle de fonctionnement sain.

### **II.5.2 Localisation**

Deuxième niveau du diagnostic, déclenché par une procédure de détection, consistant à déterminer de manière plus approfondie les composants défectueux : capteur, actionneur, processus ou unité de commande.

### **II.5.3 Identification**

L'identification d'un défaut est le fait d'estimer l'amplitude et l'évolution temporelle du défaut afin d'expliquer au mieux le comportement du système. Cette partie d'identification du défaut est la dernière phase de la procédure de diagnostic.



**Fig. II.4** – Procédure de détection et d'isolation de défauts

## II.6 Présentation des méthodes de diagnostic

Selon que l'on dispose, ou pas, d'un modèle mathématique représentatif du système, les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes. Dans le premier cas, on utilise des redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle mathématique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système, puis décider s'il est normal ou anormal. Dans le deuxième cas, c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état.

Dans l'étude qui suit, il sera question de présenter les différentes méthodes de détection et d'isolation des défauts ; L'intérêt portera surtout sur les méthodes à base de modèle mathématique.

### II.6.1 Les méthodes externes de diagnostic

Ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire la relation de cause (défaut) à effet (symptôme). La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience ; cette méthode utilise un module de reconnaissance qui utilise les observations passées et présentes issues du système, des entrées et des sorties, afin de trouver les relations de cause à effet. C'est dans cette catégorie qu'on trouve les méthodes basées sur le traitement du signal, l'analyse des signatures, les machines à vecteurs de support, les méthodes ensemblistes ainsi que les méthodes basées sur l'intelligence artificielle comme la reconnaissance des formes et les réseaux de neurones.

### **II.6.1.1 Diagnostic par traitement du signal**

Le traitement et l'analyse d'un signal peuvent être utiles dans le domaine de diagnostic, en effet, la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être réalisée aux défauts.

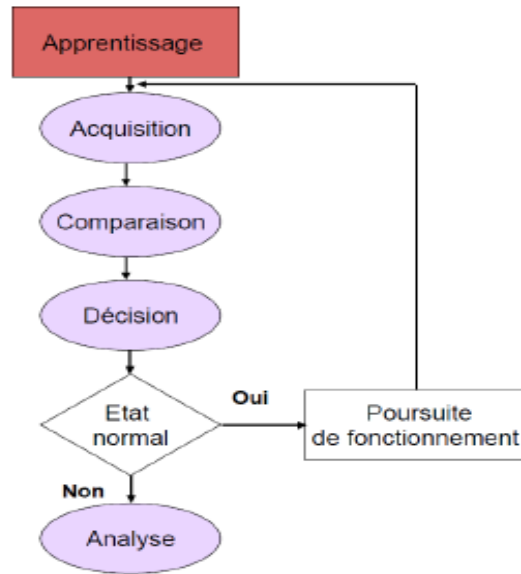
Ainsi, d'une manière générale, on peut déterminer les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut en déterminant par exemple son amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'auto corrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale [19].

### **II.6.1.2 Diagnostic par signatures**

Le diagnostic de défaillance fait appel le plus souvent à l'utilisation des signatures élaborées à partir des signaux [20].

Cette technique de diagnostic s'apparente au diagnostic des maladies dans le domaine médical. En règle générale, c'est en observant les symptômes externes sur un système, qu'un expert réalise son diagnostic et peut déterminer la nature de la défaillance. Par opposition aux méthodes internes de diagnostic, cette approche de diagnostic ne se préoccupe pas des relations physiques qui lient les défauts à leurs symptômes. Elle fait ainsi partie des méthodes de diagnostic externes [21], [22].

La première phase nécessaire dans ces techniques consiste en l'apprentissage qui permet de définir des signatures de référence représentant le mode de fonctionnement normal et des signatures types représentant des modes de défaillances particuliers bien connus sur le système. Ensuite, le diagnostic se réalise en suivant une procédure constituée des quatre étapes suivantes :



**Fig. II.5** – Schéma général représentant les étapes de diagnostic

### II.6.1.3 Diagnostic par reconnaissance de formes

Cette technique de diagnostic fait partie des méthodes externes car elle ne repose pas sur l'existence d'un modèle formel décrivant le comportement du système. Les informations disponibles proviennent essentiellement d'une base de données composée des observations et des expériences numériques et humaines sur le système. La reconnaissance de formes (RdF) est la science qui se base sur la définition d'algorithmes permettant de classer des objets ou des formes en les comparant à des formes types. Il s'agit de déterminer la forme type à laquelle une forme donnée ressemble le plus.

Les méthodes de RdF constituent des outils importants privilégiés pour la classification automatique des signatures externes correspondant aux différents modes de fonctionnement (normaux, anormaux) d'un système. Le lecteur intéressé pourra consulter [21], pour plus de détails sur la RdF.

### II.6.1.4 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des outils statistiques de l'intelligence artificielle capables d'effectuer des opérations de classification par apprentissage. L'unité de base des réseaux de neurones est le neurone formel (ou cellule), modèle très simplifié d'un neurone biologique. Le neurone formel est conçu comme un automate doté d'une fonction de transfert qui transforme ses entrées en une sortie selon des règles précises.

Il s'agit donc d'un ensemble de neurones interconnectés entre eux, organisés dans des couches successives dont chacune prend comme entrées les sorties de la précédente. Le type de connexion varie d'une architecture à une autre. Les Perceptrons Multi-couches (PMC) [23], [24] et les Réseaux à Fonction de base Radiales (RFR) [25] sont les deux architectures les plus utilisées en surveillance industrielle.

Les RNA visent à modéliser les capacités d'apprentissage du cerveau humain. Leur principal avantage par rapport aux autres outils est leur capacité d'apprentissage et de généralisation de leurs connaissances à des entrées inconnues. Il est possible également d'implémenter les RNA dans des circuits électroniques, ce qui donne la possibilité de traitement en temps réel.

### **II.6.2 Les méthodes internes de diagnostic**

Ce sont les approches basées sur les modèles mathématiques du système construits à partir des relations de la physique ou par des techniques d'identification. Ces méthodes sont principalement dérivées des techniques utilisées par les automaticiens. Le modèle servant directement de référence pour la détection des défauts, la qualité du résultat dépend directement de la qualité du modèle. Ce qui nécessite obligatoirement une modélisation précise puis une validation expérimentale avant toute utilisation industrielle.

C'est dans cette famille de méthodes qu'on trouve les méthodes basées sur les observateurs, l'estimation paramétrique, la redondance analytique et l'espace de parité, [26].

#### **II.6.2.1 Génération de résidus**

Cette première phase concerne la génération des résidus, grandeurs sensibles aux défauts. Les résidus expriment l'incohérence entre les informations disponibles (les mesures) et les informations théoriques fournies par un modèle. Ce sont des grandeurs obtenues explicitement à partir des mesures issues des capteurs et des signaux de commande des actionneurs, soit directement (redondance analytique ; espace de parité), soit indirectement par l'intermédiaire des grandeurs estimées (observateur d'état, estimation paramétrique).

En fonctionnement normal, un résidu doit être idéalement nul. En pratique, il est conçu afin d'être nul en moyenne car il dépend implicitement des perturbations liées à l'environnement et des erreurs de modélisation. En revanche dans un cas avec défaut, le résidu s'éloigne de sa valeur moyenne nulle et permet d'indiquer la présence d'un défaut. Une caractéristique importante de la qualité du générateur des résidus est la capacité de détecter des défauts de

---

faibles amplitudes. Les approches déjà citées dans ce paragraphe ont été bien développées dans le cas des systèmes linéaires. Pour les systèmes non linéaires, le problème de diagnostic est abordé soit en appliquant les techniques linéaires sur le système linéarisé autour d'un point de fonctionnement, soit en utilisant directement des techniques non linéaires.

### **II.6.2.2 Prise de décision**

Une fois le fonctionnement incorrect du système constaté, il est primordial d'agir de façon à maintenir les performances souhaitées ou à limiter les dégradations sur le système réel, [27].

Cette prise de décision permet de choisir entre plusieurs options comme arrêter le système pour faire de la maintenance ou accepter un fonctionnement dégradé. Il peut encore s'agir, quand cela est possible, de reconfigurer ou de réorganiser le système.

Le rôle de la reconfiguration est de s'affranchir des conséquences du défaut pour conserver les performances initiales lorsque cela est possible ou encore d'assurer un fonctionnement dégradé du système si celui-ci est tolérable. Il est important que le défaut soit identifié avec exactitude (étendue, amplitude, type, cause) afin d'en permettre sa compensation éventuelle.

La reconfiguration peut porter sur le système de régulation (ou une partie de celui-ci), sur la structure de la loi de commande, sur le processus physique (en présence de redondance matérielle, on peut basculer sur les éléments ayant un fonctionnement correct) ou encore sur la réévaluation des objectifs.

## **II.7 Redondances d'informations**

Le principe de base du diagnostic des défauts repose sur la notion de redondance, qui fournit au système plusieurs informations différentes sur une même variable. Des tests vont alors permettre de vérifier la cohérence de ces informations. Cependant, il existe deux approches : la première est dite traditionnelle et consiste à ajouter des capteurs afin d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système. C'est la redondance matérielle.

L'inconvénient majeur de cette approche est le coût additionnel en équipement. La deuxième approche, dite redondance analytique, consiste à développer des algorithmes de détection et de localisation des défauts en utilisant les mesures disponibles sur le système [28].

### II.7.1 Redondance physique ou matérielle

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs actionneurs, capteurs, processeurs et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote est appliqué sur les valeurs redondantes pour décider si une faute est présente ou non. Cette approche entraîne un coût important en instrumentation mais s'avère extrêmement fiable et simple à implanter. Elle est mise en œuvre essentiellement sur des systèmes à hauts risques tels que les centrales nucléaires ou les avions.

Le diagnostic utilisant la redondance physique se limite à la surveillance des éléments redondants (capteurs, actionneurs,...) présents sur une installation. À l'aide de cette unique technique, il ne sera pas possible de détecter des pannes survenant sur des éléments non redondants.



Fig. II.6 – Schéma représentant la redondance matérielle

### II.7.2 Redondance analytique

Un complément à la redondance physique consiste à exploiter les contraintes liant les différentes variables du système ; ces contraintes peuvent souvent s'exprimer sous la forme de relations analytiques liant les variables connues (relations d'entrée/sortie ou de sortie/sortie). Ces relations sont appelées relations de redondances analytiques. Le principe de la surveillance consiste à vérifier la fermeture algébrique de ces relations en utilisant les mesures prélevées en ligne sur le système. Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller. Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle. Le principe de la surveillance utilisant un modèle peut être séparé en deux étapes, à savoir : la génération de résidus et la prise de décisions [29].



## II.8 Méthode de diagnostic à base de modèle

Le principe de ces méthodes consiste à comparer le comportement du système avec le comportement du modèle qualitatif et/ou quantitatif établi. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance. Comme indiqué dans le schéma de la figure II.7. Il est nécessaire donc d'avoir des connaissances approfondies sur le procédé à diagnostiquer sous la forme d'un modèle représentatif, qui fournit des grandeurs caractéristiques du procédé qui seront constamment comparées aux grandeurs issues du procédé réel.

Selon le type du modèle (qualitatif et/ou quantitatif), on peut distinguer deux branches de méthodes : les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI et les méthodes qualitatives issues de la communauté intelligence artificielle. La dissociation entre les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives n'implique pas que ces deux aspects sont disjoints. En réalité, ces deux types d'approche peuvent coexister au sein d'une même méthode de diagnostic.

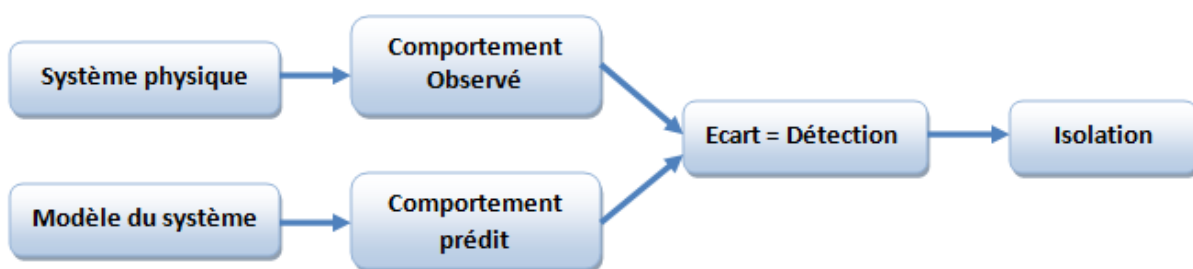


Fig. II.7 – Principe de diagnostic avec modèle

### II.8.1 Méthode de diagnostic à base de modèles qualitatifs

Les modèles qualitatifs permettent d'abstraire le comportement du procédé avec un certain degré d'abstraction à travers des modèles non plus mathématiques mais des modèles de type symbolique. Ces modèles décrivent d'une manière qualitative l'espace d'état continu du système. Contrairement aux modèles de type numérique, les modèles qualitatifs ne représentent pas la physique du système, mais ils le décrivent en terme de mode de fonctionnement [16].

### **II.8.2 Méthode de diagnostic à base de modèles quantitatifs**

Ces méthodes reposent sur l'estimation de l'état, des paramètres ou de l'espace de parité en utilisant des modèles mathématiques du système décrivant son comportement.

Si l'écart entre ces modèles et les variables du système dépasse un certain seuil, une défaillance est alors détectée. A ce moment, un résidu sera généré et comparé avec toutes les signatures des défauts connus, afin d'isoler et d'identifier la défaillance. Parmi les différentes méthodes de détection et de diagnostic utilisant des modèles mathématiques, nous trouvons principalement celles utilisant l'espace de parité, l'estimation paramétrique et celle à base d'observateurs [16].

### **II.8.3 Espace de parité**

Cette méthode est utilisable à la fois dans le cas des systèmes déterministes et dans le cas des systèmes stochastiques. Elle s'appuie sur l'élaboration de signaux permettant de tester la cohérence des mesures par rapport à leurs valeurs calculées à l'aide d'un modèle (on parle aussi de consistance des mesures, de leur parité). D'un point de vue général, la méthode consiste à vérifier les relations algébriques entrées/sorties du modèle en utilisant les mesures réelles. Pour cela, les signaux recueillis sur le système sont injectés dans les relations entrées/sorties et les signaux ainsi créés sont utilisés comme résidus. La méthode a été développée au début pour le cas statique, puis elle a été généralisée plus tard pour le cas des systèmes dynamiques. Cette généralisation utilise la redondance temporelle, c'est-à-dire des relations faisant intervenir les valeurs des sorties des capteurs et les entrées des actionneurs à différents instants. Enfin, la redondance fréquentielle est également utilisée [30].

### **II.8.4 Méthode d'estimation paramétrique**

Quand la structure du modèle est connue la détection et la localisation des défauts peuvent être effectuées en utilisant des techniques d'identification. L'idée de base consiste à estimer les paramètres du système en temps réel et de les comparer aux paramètres non affectés par les défauts. Pour cela on doit établir un modèle mathématique du système à diagnostiquer et décrire toutes les relations qui existent entre les constantes physiques et les paramètres du modèle, puis estimer les paramètres du système ainsi que ceux du modèle à

partir des entrées et sorties du système. Le vecteur de résidus est obtenu en faisant la différence entre les grandeurs estimées et les valeurs nominales [31].

### **II.8.5 Méthode de diagnostic à base d'observateurs**

Cette approche s'appuie sur une bonne connaissance du modèle et de ses paramètres, et nécessite l'intégration des diverses relations qui contrairement aux relations de parité, sont différentielles. Le diagnostic de défaut à base d'observateurs est basé sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (issues de l'observateur). L'état du système est reconstruit en se recalant à l'aide de certaines mesures, le gain de l'estimateur dépendant des objectifs et des performances désirées. Dans le cas des systèmes linéaires, la structure de base des reconstruteurs est toujours la même, un modèle parallèle corrige à l'aide de l'erreur d'estimation multipliée par un gain adéquat, mais dans le cas non linéaire le problème s'avère difficile.

En diagnostic, la construction d'observateur est beaucoup plus complexe que ce qu'il en est dans le cas de commande dans la mesure où les paramètres d'observateurs jouent un rôle aussi sur la manière dont les défauts vont affecter les résidus. En plus d'assurer la stabilité, ces paramètres doivent permettre de structurer le résidu afin de localiser les défauts. Cependant, pour ce type de stratégie, si une anomalie apparaît, elle affecte en général toutes les composantes du vecteur résidu ; de ce fait, le problème de localisation est plus complexe que ce qu'il en est dans le cadre de l'espace de parité. Pour résoudre ce problème, une solution consiste à construire des bancs d'observateurs où chacun d'entre eux surveille un défaut [32].

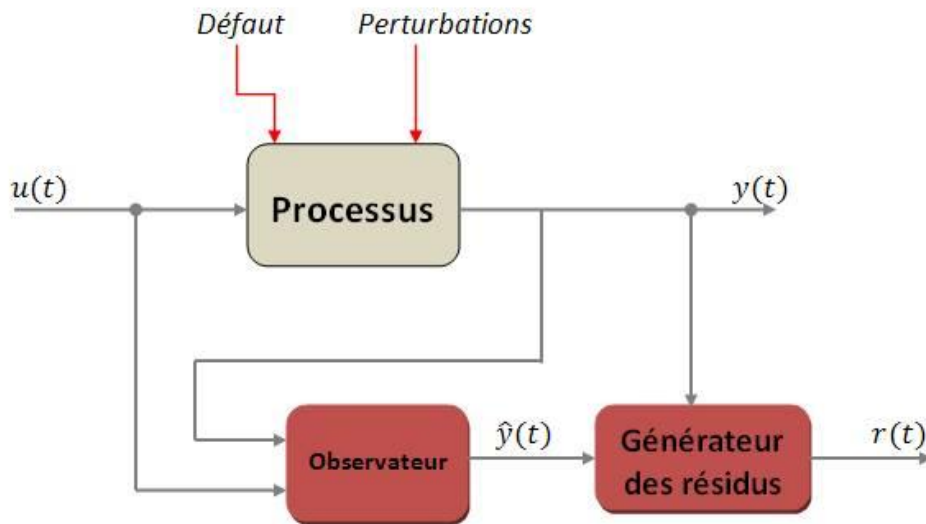
#### **II.8.5.1 Observateurs d'état**

Les observateurs d'état sont des algorithmes, fondés sur un modèle du procédé, chargés de reconstruire l'état de celui-ci. La méthode par observateurs d'état consiste à estimer les variables d'état d'un système en utilisant le modèle mathématique ainsi que des mesures ou un sous-ensemble de mesures, ce qui permet de reconstruire les sorties du système. Cette reconstruction permet d'étudier la consistance comportementale du modèle vis à vis du système réel en comparant les sorties mesurées avec celles estimées.

Par définition, un observateur (ou estimateur ou reconstruteur d'état) est un système ayant comme entrée les entrées et les sorties du système réel et dont la sortie converge vers une estimation des variables d'état (ou d'une partie des variables d'état) du processus.

Le signal d'écart (ou l'erreur d'estimation de sortie) entre les mesures et les sorties estimées est utilisé comme un résidu [33].

De manière générale, ce concept peut être représenté par la figure II.8



**Fig. II.8** – Génération des résidus par utilisation des observateurs d'état.

Dans la littérature, le terme "observateurs dans le cas déterministe" réfère aux observateurs classiques de Luenberger dans le cas stochastique. Notons que l'utilisation de la méthode de diagnostic à base d'observateur est conditionnée par l'existence de ce dernier. Plusieurs techniques d'observation ont été appliquées au diagnostic des systèmes. Dans la suite, les observateurs à entrées inconnues sont rappelés.

### II.8.5.2 Observateur à entrées inconnues

Souvent, il existe des cas où certaines entrées du système ne sont pas mesurables mais qui agissent sur le système. Dans ce cas, les observateurs utilisés portent le nom d'observateurs à entrées inconnues (Unknown Input Observer : UIO) [34]. Ces observateurs visent à annuler l'erreur d'estimation d'une ou de plusieurs combinaisons linéaires des états du système étudié, et ce, indépendamment de la présence d'entrées inconnues (perturbations). La conception d'un observateur à entrées inconnues permettra de s'affranchir de ces incertitudes sous réserve de l'observabilité du système. Il faut noter que les observateurs à

entrées inconnues utilisent les principes de base des observateurs de Luenberger avec des conditions structurelles supplémentaires.

### II.8.5.3 Structuration des résidus par un banc d'observateurs

La détection d'un défaut nécessite un seul observateur pour générer le résidu, mais il y a un inconvénient lorsque nous entamons l'étape de localisation, puisque la forme des résidus de reconstruction de sortie montre leur dépendance vis-à-vis des défauts à détecter. Comme ces derniers sont multiples, ce qui nous empêche de localiser la source du défaut. La situation idéale étant qu'un résidu soit sensible à un défaut particulier. Cette structuration, qui correspond à un découplage, peut être effectuée par un banc d'observateurs, ces derniers construits selon que l'on souhaite détecter des défauts d'actionneurs ou de capteurs à partir d'une partie des entrées ou une partie des sorties du système.

Chaque observateur du banc d'observateur est synthétisé pour qu'il soit sensible à un sous ensemble de défauts  $d_i$  et insensible aux autres.

Le nombre d'observateurs à intégrer dans le banc dépend du nombre de défauts à détecter et à isoler. Trois possibilités sont envisagées :

- Les défauts doivent être détectés mais pas localisés : dans cette configuration le banc d'observateur est composé d'un unique observateur qui doit être affecté par tous les défauts et insensible aux perturbations.

- Cas de défauts uniques : ce cas de figure, très fréquemment étudié, est moins restrictif qu'il n'y paraît. En effet, il est rare (mais pas impossible) que plusieurs capteurs, actionneurs ou composants du système tombent en panne simultanément. Le banc d'observateurs sera alors constitué d'autant d'observateurs qu'il y a de défauts à isoler. Chacun de ces observateurs sera synthétisé de manière à être sensible à tous les défauts sauf un. Ainsi, le  $i^{\text{ème}}$  observateur sera obtenu en considérant le  $i^{\text{ème}}$  défaut  $d_i$  comme entrée inconnue. La table de codage des défauts sera alors composée de 1 à l'exception d'une diagonale de 0.

- Cas de défauts multiples : la détection et la localisation de tous les défauts, lorsque ceux-ci peuvent intervenir simultanément, nécessitent de pouvoir découpler chaque observateur de tous les défauts sauf un, la table de codage des défauts sera alors composée de 0 à l'exception d'une diagonale de 1.

Les défauts sur une installation peuvent survenir à trois niveaux : les composants du système (défauts internes), les actionneurs et enfin les capteurs. Suivant la position du défaut, il est possible d'adapter la construction du banc d'observateurs pour améliorer les performances du système de surveillance.

#### II.8.5.4 Les défauts actionneurs

Dans la représentation par l'espace d'état, ces défauts sont modélisés par un terme additif sur les composantes de la matrice de commande. Deux configurations sont envisagées:

- Défauts uniques : Dans ce cas, le banc d'observateurs à entrées inconnues peut être construit suivant l'architecture GOS (Generalized Observer Scheme) présentée sur la figure

(II.9.a). le  $i^{\text{ème}}$  observateur est piloté par toutes les entrées sauf la  $i^{\text{ème}}$  et toutes les sorties. La sortie de cet observateur est donc sensible aux défauts de toutes les entrées sauf ceux de la  $i^{\text{ème}}$ , chaque résidu issu d'un UIO est insensible à un défaut actionneur particulier et sensible à tous les autres. Il est donc possible de détecter et localiser les défauts actionneurs lorsque ceux-ci interviennent séparément.

- Défauts multiples : le banc d'observateurs pourra être construit suivant l'architecture DOS (Dedicated Observer Scheme) présentée sur la figure (II.9.b). le  $i^{\text{ème}}$  observateur est piloté par la  $i^{\text{ème}}$  entrée et toutes les sorties ; les  $(m-1)$  autres entrées sont considérées comme inconnues et la sortie de ce  $i^{\text{ème}}$  observateur est insensible aux défauts des entrées non utilisées donc chaque résidu issu d'un UIO est sensible à un et un seul défaut actionneur ce qui permet de détecter et localiser les défauts même quand ceux-ci surviennent simultanément.

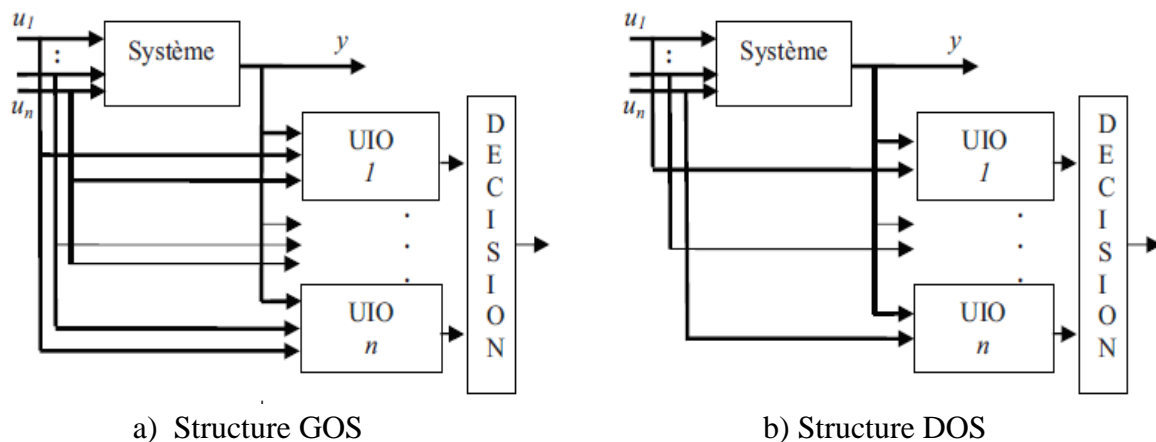


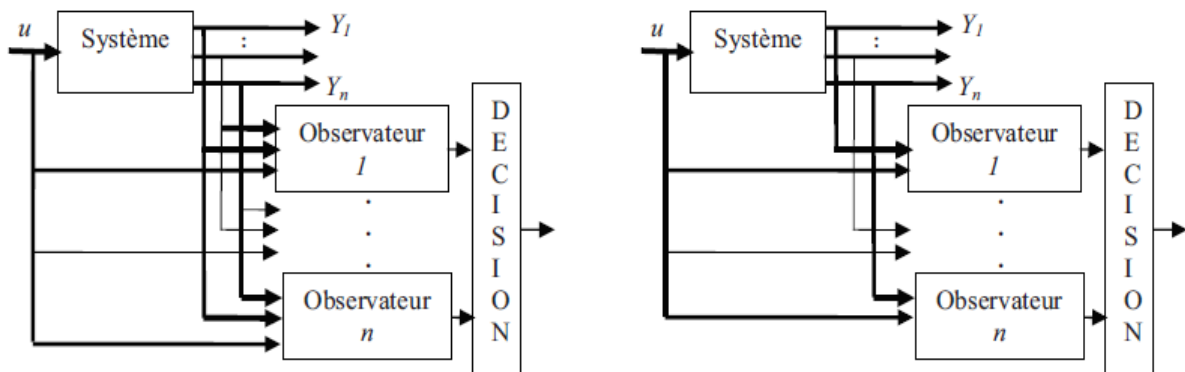
Fig. II.9 – Localisation de défauts actionneurs

### II.8.5.5 Les défauts capteurs

En représentation d'état, ces défauts sont modélisés par des termes additifs sur les composantes de la matrice de sortie. Deux hypothèses sont encore envisageables pour la construction d'un banc d'observateurs suivant que les hypothèses de défauts uniques ou défauts multiples sont retenues.

- Défauts uniques : dans ce cas, le banc d'observateurs peut être construit selon l'architecture GOS présentée à la figure (II.10.a) le  $i^{\text{ème}}$  observateur est piloté par toutes les sorties sauf la  $i^{\text{ème}}$ , et toutes les entrées. La sortie de cet observateur est donc sensible aux défauts de tous les capteurs sauf ceux de la  $i^{\text{ème}}$ . Il est donc possible de détecter et de localiser les défauts capteurs lorsque ceux-ci interviennent séparément.

- Défauts multiples : le banc d'observateurs peut être construit selon le schéma DOS présenté sur la figure (II.10.b) le  $i^{\text{ème}}$  observateur est piloté par la  $i^{\text{ème}}$  sortie et toutes les entrées; la sortie de ce  $i^{\text{ème}}$  observateur est insensible aux défauts des sorties non utilisées donc chaque résidu issu d'un observateur est sensible à un et un seul défaut capteur ce qui permet de détecter et localiser les défauts capteurs même lorsqu'il surviennent de façon simultanée.



a) Structure GOS

b) Structure DOS

**Fig. II.10** – Localisation de défauts capteurs

## II.9 Principe d'un observateur

### II.9.1 Équation d'état

L'état d'un modèle représente l'ensemble des paramètres nécessaires pour connaître le comportement de la sortie d'un système en fonction des entrées auxquelles il est soumis. Modéliser un système grâce à ces équations d'état consiste à construire un modèle ne faisant intervenir que des équations différentielles d'ordre 1. La structure de la représentation d'état est commune à tous les systèmes linéaires et un système continu linéaire à coefficients constants est décrit par l'équation d'état suivante [33] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où pour tout instant  $t$ ,  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$ , et  $y(t) \in \mathbb{R}^l$  représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur d'entrée et le vecteur de sortie du système.  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$  et  $C \in \mathbb{R}^{l \times n}$ , représentent les matrices constantes connues du système. Ces matrices ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) sont directement calculées à partir des équations de fonctionnement du système.

**Remarque :** Dans certains travaux, on peut trouver une injection de l'entrée directement dans l'équation de sortie par le terme additif  $Du(t)$ . Cependant, les systèmes faisant intervenir ce terme sont peu fréquents. C'est pour cela que dans notre étude nous choisissons de ne pas considérer ce terme.

### II.9.2 Observabilité des systèmes linéaires

L'observabilité du système décrit par l'équation d'état (II.1) est garantie si et seulement si

$$\text{Rang}(O) = \text{rang} \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} = n \quad (\text{II.2})$$



Par conséquent le système linéaire (II.1) est observable, si le rang de la matrice d'observabilité  $O$  est égal à la dimension  $n$  de ce système. Dans le cas où le rang de la matrice  $O$  est inférieur à  $n$  on parle alors, d'observabilité partielle.

### II.9.3 Observateurs des systèmes linéaires

Une solution simple optimale au problème de l'estimation de l'état des systèmes linéaires a été proposée par Luenberger dans le cadre déterministe, et par Kalman dans le cadre stochastique. Dans les deux cas, on considère le modèle dynamique du système linéaire défini par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Lw(t) \\ y(t) = Cx(t) + v(t) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Où  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$ ,  $y(t) \in \mathbb{R}^p$ ,  $w(t) \in \mathbb{R}^r$  et  $v(t) \in \mathbb{R}^p$  sont deux bruits gaussiens d'espérance nulle, de covariances respectives  $Q$  et  $R$ . Ces bruits sont supposés non corrélés. Les matrices du système sont de dimensions appropriées, et les conditions initiales sont définies par  $x(0) = x_0$

#### II.9.3.1 Filtre de Kalman

La théorie de l'observateur de Kalman nécessite la résolution d'une équation de Riccati. Kalman utilise les propriétés statistiques des bruits  $w$  et  $v$  et propose la structure d'observateur suivante :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + Bu(t) + Ky(t) - C\hat{x}(t) \quad (\text{II.4})$$

Et minimiser la matrice de covariance de l'erreur d'estimation  $P = E [e(t)e(t)^T]$ , on obtient l'expression du gain de l'observateur :

$$K = PC^T R^{-1} \quad (\text{II.5})$$

Où  $P$  est solution de l'équation de Riccati :

$$AP + PA - PC^T R^{-1} CP + LQL^T = 0 \quad (\text{II.6})$$

Sous certaines conditions, on peut montrer que la matrice  $P$  tend vers une limite et que le filtre est stable, ce qui permet éventuellement de conserver pour  $K$  sa valeur en régime permanent.

### II.9.3.2 Observateur complet ou de Luenberger

La théorie de l'observation de **Luenberger** repose essentiellement sur des techniques de placement de pôles. On se place dans le cas déterministe, ou les bruits  $w$  et  $v$  sont nuls, **Luenberger** propose l'observateur suivant pour le système (II.3)

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t). \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Le terme correctif  $K(y(t) - \hat{y}(t))$  fait apparaître le gain de correction  $K$ , également appelé gain de l'observateur, relatif à l'erreur de la reconstruction de la sortie. On peut aussi écrire l'observateur sous la forme suivante

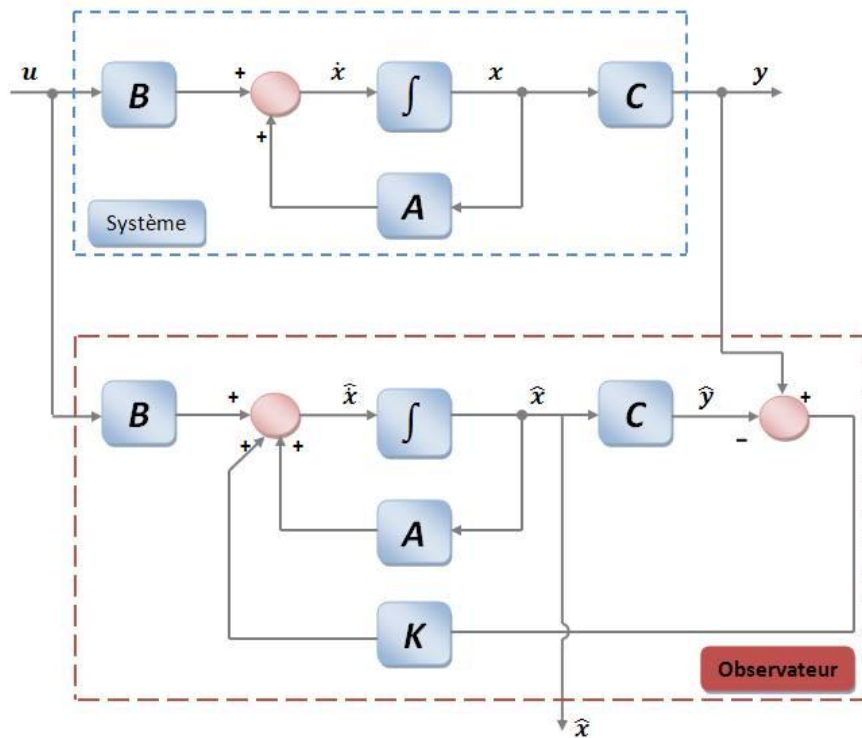
$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - KC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ky(t) \quad (\text{II.8})$$

La dynamique de l'erreur de reconstruction, définie par  $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ , peut s'écrire :

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (A - KC)\tilde{x}(t). \quad (\text{II.9})$$

A partir de la condition initiale  $\tilde{x}(0) = x(0) - \hat{x}(0)$ , l'évolution de cette erreur d'estimation est telle que :

$$\tilde{x}(t) = \exp[(A - KC)t]\tilde{x}(0). \quad (\text{II.10})$$



**Fig. II.11** – Diagramme structurel d'un observateur de Luenberger

Afin que l'observateur soit asymptotique, il faut que l'erreur d'estimation tende vers 0 lorsque  $t$  augmente. En effet, à  $t = 0$ ,  $\tilde{x}(0) \neq 0$  car l'état étant inaccessible, on ne peut en général pas choisir  $x(0) = \hat{x}(0)$ .

Afin de garantir une convergence asymptotique de l'erreur d'estimation ( $\tilde{x}(t) \rightarrow 0$  pour  $t \rightarrow \infty$ ) et donc un bon fonctionnement de l'observateur, il faut choisir  $K$  de façon judicieuse.

Les valeurs propres de  $A - KC$  peuvent être fixées arbitrairement si et seulement si  $(A, C)$  est observable. La notion de stabilité d'un système en automatique est essentielle [35].

Soit le système régi par (II.1), On dit que ce système est asymptotiquement stable si la matrice  $A$  est de Hurwitz. Une matrice  $A$  est dite de Hurwitz si toutes ses valeurs propres sont à parties réelles strictement négatives.

Lorsque le système n'est pas observable, il n'est pas possible de construire un observateur dont on choisit les dynamiques. Cependant, si le système est détectable il sera possible de dimensionner un observateur asymptotiquement stable [35].

C'est-à-dire que pour un système régi par (II.1) il est possible de dimensionner un observateur asymptotiquement stable si et seulement si la paire (A, C) est détectable. Les valeurs propres de  $A - KC$  sont alors toutes ou en partie fixées [36].

## II.10 Exemple de conception d'un observateur d'état complet

Soit le système suivant

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -5 & -6 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

### Etape1:

- Vérifier si le système est observable

Matrice d'observabilité :

$$N = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.12)$$

$$\text{Rang}(N) = 3 = n \quad \Rightarrow \quad \text{Observable}$$

### Etape2 :

- Du polynôme caractéristique de la matrice A, déterminer les coefficients  $a_1, a_2, \dots, a_n$

Polynômes caractéristique :

$$\det(sI - A) = s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n \quad (II.13)$$

- Ainsi, pour l'exemple :

$$\det(sI - A) = s^3 + 6s^2 + 5s + 1 \quad (II.14)$$

- Donc:

$$a_1 = 6 ; a_2 = 5 ; a_3 = 1$$

**Etape3:**

- Construire la matrice de transformation  $Q = (WN^*)^{-1}$

Rappel :

$$W = \begin{bmatrix} a_{n-1} & \dots & a_1 & 1 \\ \vdots & & a_1 & 1 & 0 \\ a_1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Construire la matrice W :

$$W = \begin{bmatrix} a_2 & a_1 & 1 \\ a_1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 6 & 1 \\ 6 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Obtenir la matrice de transformation Q :

$$Q = (WN^*)^{-1}$$

$$\text{Ici : } Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -6 \\ 1 & -6 & 31 \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

**Etape4 :**

- Choisir les valeurs propres désirées :
  - Pôles en boucle fermée
  - Ecrire le polynôme caractéristique correspondant.

$$(s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n) = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n \quad (\text{II.18})$$

- Ce qui mène aux coefficients :  $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$

Donc, si on choisit les pôles suivants :

$$S = -4 \pm 8j$$

$$S = -10$$

- Cela mène à :

$$(s + 4 - 8j)(s + 4 + 8j)(s+10) = s^3 + 18s^2 + 160s + 800 \quad (\text{II.19})$$

$\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3$

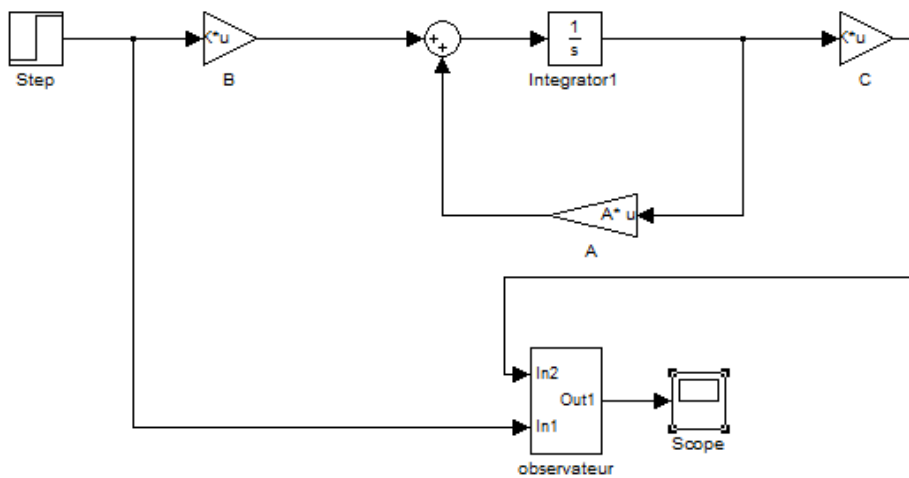
**Etape5 :**

- Calcule de la matrice de gain K :

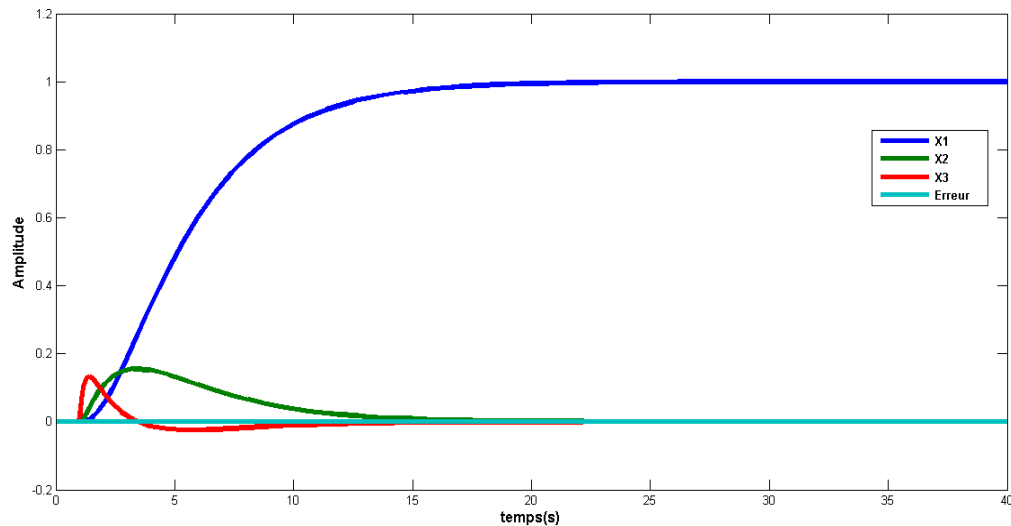
$$K = Q \begin{bmatrix} (\alpha_n - a_n) \\ (\alpha_{n-1} - a_{n-1}) \\ \vdots \\ (\alpha_1 - a_1) \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Dans l'exemple :

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -6 \\ 1 & -6 & 31 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (800 - 1) \\ (160 - 5) \\ (18 - 6) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12 \\ 83 \\ 241 \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

**II.10.1 Simulation sous Matlab**

**Fig. II.12** – Schéma bloc de l'exemple sur Simulink



**Fig. II.13** – Résultat de la simulation

## II.11 Conclusion

Dans la littérature de nombreuses méthodes de diagnostic ont été développées en vue de la détection et la localisation des défauts dans les différents équipements du système industriel. Dans ce chapitre, une revue bibliographique non exhaustive a été réalisée pour rappeler les notions de base de ces différentes méthodes qui se classent essentiellement en deux grandes familles.

La première famille de méthodes, ou méthodes externes où aucun modèle n'est disponible pour décrire le comportement du système. Le diagnostic est effectué dans ce cas en utilisant les observations passées et présentes du système.

La deuxième famille de méthodes, ou méthodes internes, sont plus intéressantes dans le cas où elles reposent sur l'existence d'un modèle mathématique du système, construit à partir des relations de la physique ou par des techniques d'identification. Dans cette catégorie, un résidu est généré en comparant les mesures disponibles avec les informations a priori fournies par le modèle ; c'est par analyse de ce vecteur résidu que le diagnostic peut être effectué.

Dans le chapitre qui suit nous allons procéder à la détection de défauts dans notre modèle éolien décrit précédemment ; et ce à base d'observateur à savoir l'observateur d'état complet ou de **Luenberger**.



## *Chapitre III*

# *Détection de défauts dans une éolienne à deux masses à base d'observateurs*



## Chapitre III : Détection de défauts dans une éolienne à deux masses à base d'observateurs

### III.1 Introduction

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie exploitée par l'homme, comme dans les moulins à vent pour le pompage de l'eau, cette énergie offre deux grands avantages en étant totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet et aucun déchet mais le principal problème de cette source d'énergie renouvelable, est le désir d'augmenter la disponibilité et la fiabilité de l'éolienne, de réduire les arrêts et les visites de maintenance. Pour satisfaire ces exigences, il faut concevoir un système de surveillance et de diagnostic de défauts assez performant ; la surveillance et le diagnostic de défauts des éoliennes permettent de prédire et détecter rapidement toute occurrence d'une défaillance avant qu'elle ne se propage et ne conduise à l'arrêt ou voire même à la destruction de l'appareil éolien comme dans la figure III.1.



**Fig. III.1** – Destruction d'une éolienne par prise de feu.

Le système éolien est de plus en plus complexe, et l'opération de diagnostic qui consiste à détecter et localiser les défauts qui affectent le système est devenu indispensable. L'objectif de la FDI est d'assurer la sûreté de fonctionnement et la disponibilité de ces systèmes afin d'optimiser la génération de l'électricité avec un coût minimal. Toutefois,

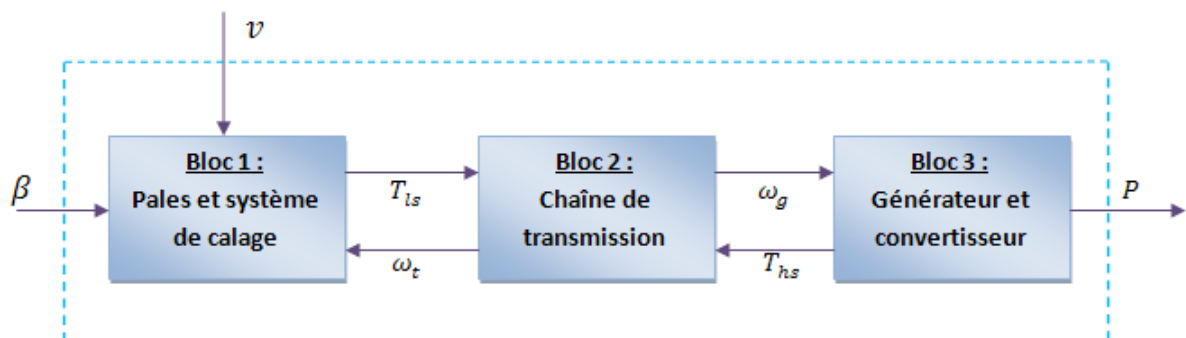
plusieurs difficultés et défis sont rencontrés dans la conception du système FDI à savoir : la structure complexe de l'éolienne, de son instabilité, de la complexité de son aérodynamique et de sa non-linéarité [37].

### III.2 Fonctionnement général

Le modèle de l'éolienne utilisée dans la partie 2 du chapitre I est décrit ici par un simple schéma Simulink composé des modèles des différents sous-systèmes de la turbine éolienne.

#### III.2.1 Modèle Simulink simplifié

L'objectif de cette partie est de montrer le schéma bloc dans lequel les différents sous-systèmes de l'éolienne sont représentés par des blocs ; la figure III.2 donne une vue d'ensemble du modèle de l'éolienne CART [38].



**Fig. III.2** – Une vue d'ensemble du modèle de simulation utilisé pour la détection des défauts de l'éolienne CART.

Les différents blocs présentés sur la figure III.2 sont définis comme suit [39], [40]

- **Bloc 1 : Le rotor "Pales et système de calage"** c'est le sous-système des deux pales qui, avec le nez de l'éolienne ou le moyeu, constitue le rotor de l'éolienne. La vitesse du vent  $v$  est à l'origine de la force motrice du système. Le rotor est quant à lui entraîné par l'énergie du vent. En effet, les pales extraient l'énergie cinétique du vent et la transforment par le

phénomène de portance aérodynamique en mouvement de rotation ; ainsi, c'est par ce mouvement de rotation des pales autour de l'axe horizontale qui est le moyen que l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie mécanique de rotation. L'arbre primaire a la fonction de transmettre le mouvement du rotor au bloc 2, cet arbre tourne à la même vitesse que le rotor. Le terme "pitch" dans la notation anglaise fait référence aux éoliennes à pas variable, plus précisément, celles dont le rotor est muni des pales inclinables qui permettent leur ajustement en fonction de la direction du vent, et ce, par l'intermédiaire d'un système de contrôle par calage.

- **Bloc 2 : La chaîne de transmission ou multiplicateur de vitesse** c'est la chaîne de transmission ou le multiplicateur de vitesses qui est constituée, en général, d'un assemblage d'engrenages ; il s'agit d'un système de transmission de puissance qui reçoit le mouvement de rotation et entraîne le générateur (bloc 3). Il est nécessaire d'accorder la vitesse de rotation du rotor aux exigences du convertisseur car la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec des générateurs de courant classiques. Le multiplicateur accélère le mouvement du rotor pour pouvoir faire fonctionner le générateur (bloc 3). L'arbre secondaire, qui est beaucoup plus rapide que l'arbre primaire, transmet le mouvement de rotation adapté au générateur/convertisseur (bloc 3).

En conclusion, le bloc 2 fait la connexion entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne le 3<sup>ème</sup> bloc, le sous-système générateur/convertisseur.

- **Bloc 3 : Le générateur/convertisseur.** Le générateur transforme l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur en énergie électrique et le convertisseur traite cette énergie résultante pour qu'elle puisse être utilisée.

### III.2.2 Linéarisation du modèle

Le comportement dynamique d'un système de turbine éolienne sera un mélange de l'aérodynamique, la dynamique des structures et des phénomènes de conversion électrique. L'interaction de ces sous-modèles peut être écrite comme un modèle non linéaire. Avec

linéarisation autour du point de fonctionnement et certaines hypothèses supplémentaires, nous pouvons obtenir l'équation complète de l'état de linéarisation du système d'éolienne. Tous les paramètres de l'équation de linéarisation sont les valeurs relatives dans le point de fonctionnement choisi [7], [41]. Pour cela, reprenons les équations régissant le comportement de notre modèle de l'aéroturbine décrit en partie 2 du chapitre I.

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - K_r \omega_t \quad (\text{III.1})$$

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \quad (\text{III.2})$$

$$T_{ls} = K_{ls} \left( \omega_t - \frac{\omega_g}{n_g} \right) + B_{ls} \left( \theta_t - \frac{\theta_g}{n_g} \right) \quad (\text{III.3})$$

En introduisant la dérivée de  $T_{ls}$ , ce système d'équations devient

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_r} T_a - \frac{K_r}{J_r} \omega_t - \frac{1}{J_r} T_{ls} \quad (\text{III.4})$$

$$\dot{\omega}_g = \frac{1}{n_g J_g} T_{ls} - \frac{K_g}{J_g} \omega_g - \frac{1}{J_g} T_{em} \quad (\text{III.5})$$

$$\dot{T}_{ls} = K_{ls} \left( \dot{\omega}_t - \frac{\dot{\omega}_g}{n_g} \right) + B_{ls} \left( \omega_t - \frac{\omega_g}{n_g} \right) \quad (\text{III.6})$$

En remplaçant (III.4) et (III.5) dans (III.6), il vient

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_r}{J_r} & 0 & -\frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{K_g}{J_g} & \frac{1}{n_g J_g} \\ \left( B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r} \right) & \frac{1}{n_g} \left( \frac{K_{ls} K_g}{J_g} - B_{ls} \right) & -K_{ls} \left( \frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} \\ 0 \\ \frac{K_{ls}}{J_r} \end{bmatrix} T_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ \frac{K_{ls}}{n_g J_g} \end{bmatrix} T_{em}$$

(III.7)

$$\text{Et la sortie est } y = [0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Les paramètres du modèle sont définis dans le tableau I.2 dans le chapitre I.

Sous une forme plus compacte, le système s'écrit

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}T_{em} + \mathbf{B}_1T_a \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Avec

$$\mathbf{x} = [\omega_t \quad \omega_g \quad T_{ls}]^T \quad ; \quad y = \omega_g$$

### III.3 Système de contrôle par calage

Le modèle possède des pales inclinables "pitch", cela est fait à travers d'un système de contrôle par calage. Ce système possède deux actionneurs identiques. L'actionneur permet d'ajuster l'angle d'une pale en la pivotant.

Chacun des deux actionneurs est un système hydraulique qui peut être modélisé par une fonction de transfert en boucle fermée du second ordre, décrite par l'équation suivante [40]

$$\frac{\beta(s)}{\beta_r(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{III.10})$$

Où  $\beta(s)$  et  $\beta_r(s)$  représentent l'angle de la pale et son angle de référence respectivement

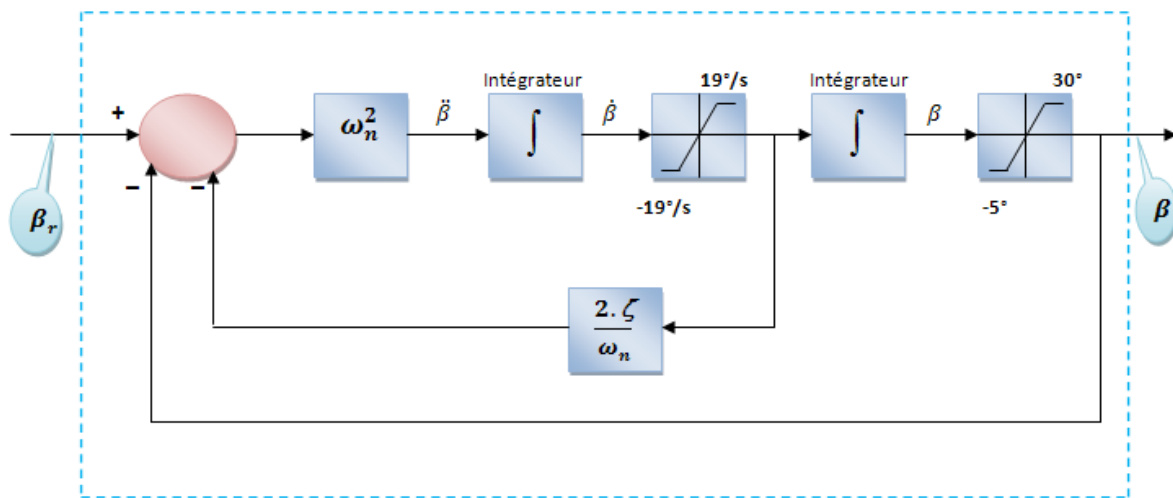
$[\omega_n, \zeta] = [11.11 \text{rad/s}, 0.6]$  sont les paramètres nominaux de l'actionneur où  $\omega_n$  est la pulsation naturelle et  $\zeta$  est le coefficient d'amortissement.

### III.3.1 Schéma bloc de l'actionneur

Le schéma bloc de l'actionneur est obtenu en dérivant directement l'équation III.10. Cette dérivée est démontrée par l'équation III.11 [40].

$$\omega_n^2 \beta_r(t) = \frac{d^2 \beta(t)}{dt^2} + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \frac{d\beta(t)}{dt} + \omega_n^2 \beta(t) \quad (\text{III.11})$$

La figure III.3 illustre le schéma bloc de cet actionneur.



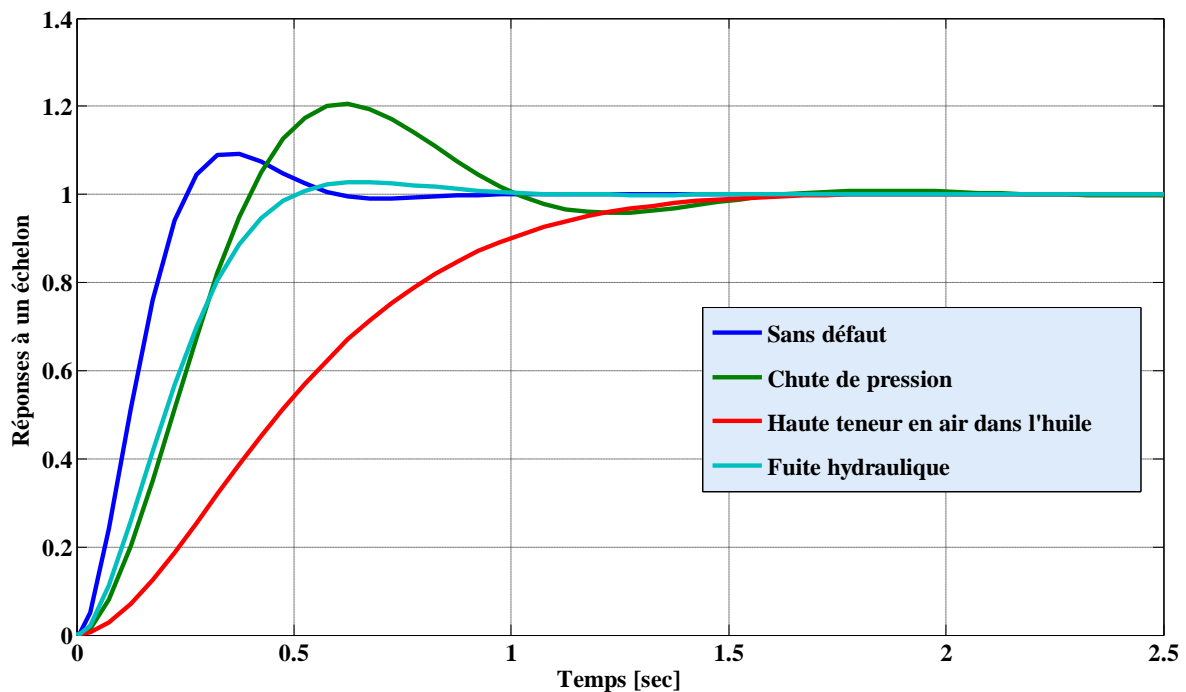
**Fig. III.3** – Schéma bloc du système hydraulique de l'actionneur.

### III.3.2 Les différents défauts affectant le système hydraulique

Les différentes valeurs de  $\omega_n$  et de  $\zeta$  de l'actionneur décrit par l'équation III.10 sont fournies par le tableau III.1 pour le cas sans défauts et les cas avec défauts. On peut voir que les deux paramètres  $\omega_n$  et  $\zeta$  varient en fonction du type de défaut [42]. Les réponses à un échelon pour les différents cas décrits dans le tableau III.1 sont présentées dans la figure III.4.

Etat de l'actionneur	Les valeurs des paramètres	
	$\zeta$	$\omega_n$ (rad/s)
Sans défaut	<b>0.6</b>	<b>11.11</b>
Chute de pression (basse pression)	<b>0.45</b>	<b>5.73</b>
Haute teneur en l'air dans l'huile	<b>0.9</b>	<b>3.42</b>
Fuite hydraulique	<b>0.75</b>	<b>7.27</b>

**Tableau. III-1** – Paramètres des défauts possibles dans le système hydraulique de l'actionneur.



**Fig. III.4** – Réponses à un échelon des différents modèles d'actionneurs.

Ces réponses montrent clairement que les actionneurs défectueux ont une dynamique plus lente que l'actionneur sans défaut.

### III.4 Les défauts possibles du modèle

Il existe différents types de défauts pouvant apparaître dans les différents sous-systèmes du modèle ; les défauts ont différents degrés de gravité dont, certains sont très

graves et devraient entraîner un arrêt rapide en toute sécurité de la turbine et d'autres sont moins graves [37].

#### III.4.1 Défauts capteurs

Dans le sous-système présenté par le bloc 1 sur la figure III.2, les défauts capteurs sont ceux qui agissent sur les capteurs mesurant les positions angulaires des pales du rotor. De plus, les capteurs mesurant la vitesse du rotor peuvent être défectueux. De même, des défauts peuvent affecter les capteurs mesurant la vitesse du générateur ; en effet, le système est équipé de capteurs dupliqués.

Les défauts qui affectent les capteurs mesurant ces grandeurs, peuvent être d'origine électrique ou d'origine mécanique.

#### III.4.2 Défauts actionneurs

Les actionneurs sont les deux systèmes hydrauliques " *pitch* " et le convertisseur, ils permettent, respectivement, le calage des pales et le réglage du couple générateur pour commander la vitesse de rotation du générateur et le rotor, ces actionneurs sont également soumis à un dysfonctionnement.

Les défauts considérés pour les deux systèmes de calage des pales représentés par le sous-système (bloc 1 sur la figure III.2), sont traduits par une variation dans les valeurs des paramètres  $\omega_n$  et  $\zeta$  définis dans l'équation III.10; ces défauts sont dus aux différentes raisons :

- Soit, en raison d'une chute abrupte de la pression. Selon les considérations, ce défaut affecte l'actionneur agissant sur la première pale.
- Soit, en raison d'une haute teneur en air dans l'huile. Selon les considérations, ce défaut affecte l'actionneur agissant sur la deuxième pale.



### III.4.3 Défaut système

Un défaut système peut apparaître dans la chaîne de transmission, représentée par le bloc 2 sur la figure III.2, ce défaut est dû à la variation du frottement dans le temps, ce qui peut avoir comme effet de briser la chaîne ; en effet, les multiplicateurs d'éoliennes sont soumis à des conditions de service extrêmement variées qui peuvent, dans certains cas, pousser les roulements au-delà de leurs limites. Pour désigner ce phénomène, on parle également parfois, de matériau cassant, de durée de vie réduite, d'usure précoce, anormale.

### III.5 Récapitulatif des défauts à détecter

Dans le travail qui suit, nous allons mettre en œuvre la détection de cinq défauts dont deux défauts actionneurs, deux défauts capteurs et un défaut système.

- Le premier défaut s'agit d'une chute de pression hydraulique dans l'actionneur de la première pale, ce dernier se manifeste par un changement brutal de la dynamique de l'actionneur avec  $\omega_{n1} = 5.73 \text{ rad/s}$  et  $\zeta_1 = 0.45$  entre 30sec et 100sec.
- Le deuxième défaut est un défaut capteur mesurant la vitesse du rotor  $\omega_t$  qui surgit entre 300sec et 400sec.
- Le troisième défaut est aussi un défaut capteur mesurant la vitesse du générateur  $\omega_g$  qui se manifeste à partir de 420sec jusqu'à 550sec.
- Le quatrième défaut est une haute teneur en air dans l'huile hydraulique qui affecte l'actionneur de la deuxième pale, ce dernier est introduit par le changement des paramètres de cet actionneur avec  $\omega_{n2} = 3.42 \text{ rad/s}$  et  $\zeta_2 = 0.9$  entre 100sec et 150sec.
- Enfin, le cinquième défaut est un défaut système qui apparaît au niveau du multiplicateur entre 150sec et 280sec.

### **Hypothèses**

Dans le cadre de la détection et de l'isolation des différents défauts mentionnés qui peuvent toucher notre éolienne, il est supposé que :

- Un seul défaut peut apparaître à n'importe quel moment.

Cette hypothèse sert à l'isolation du type de défaut

- Si un défaut jaillit, alors il existe.
- Le profil du vent utilisé est une mesure réelle de la vitesse obtenue d'un parc éolien ; sa séquence est donnée par la figure I.21 dans la partie 2 du chapitre I.

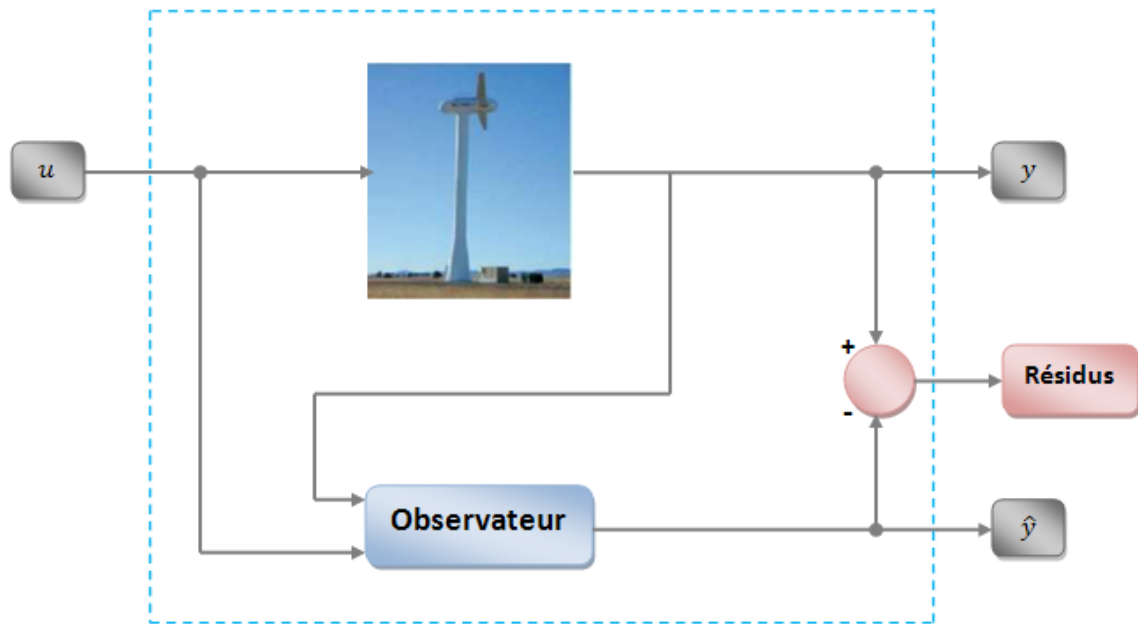
## **III.6 Diagnostic des défauts dans une éolienne**

### **III.6.1 Principe général**

Dans ce chapitre, une méthode de diagnostic des défauts par observateur d'état complet ou de **Luenberger** est proposée. Les observateurs étudiés précédemment (section II.9.3) peuvent être utilisés pour mettre en évidence l'apparition de défauts affectant le système ou les actionneurs ou les capteurs. Pour le diagnostic, l'utilité de la reconstruction d'état est plus discutable car sa connaissance ne permet pas toujours de détecter des dysfonctionnements ; pour cela, il serait nécessaire de le comparer à un état de référence de bon fonctionnement.

La comparaison, entre les sorties mesurées et les sorties estimées, permet de mettre en évidence un écart entre le fonctionnement réel du système et son fonctionnement sain ; en d'autres termes, cet écart peut être considéré comme un *résidu*. Pour cela, des signaux de résidus sont créés par comparaison des grandeurs estimées et des grandeurs réelles, selon le schéma de principe présenté par la figure III.5.

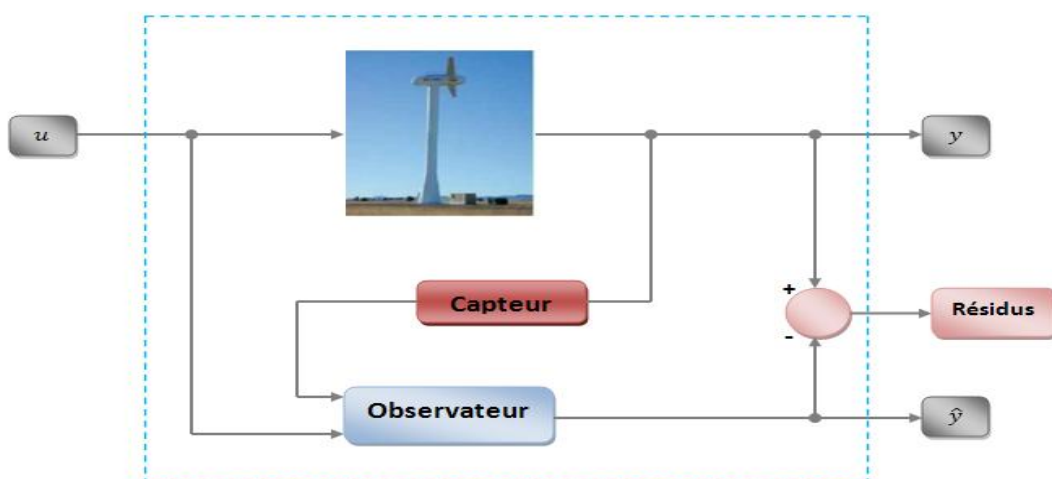
L'apparition d'un résidu significativement non-nul traduit un fonctionnement anormal du système, on parle de la *détection* d'une faute. Il est alors intéressant d'identifier le composant en défaut, c'est la *localisation*. Ces traitements sont l'objet du diagnostic à base d'observateur dont la figure III.5 propose une représentation.



**Fig. III.5** – Principe de la génération de résidus à l'aide d'un observateur.

### III.6.2 Diagnostic des défauts capteurs

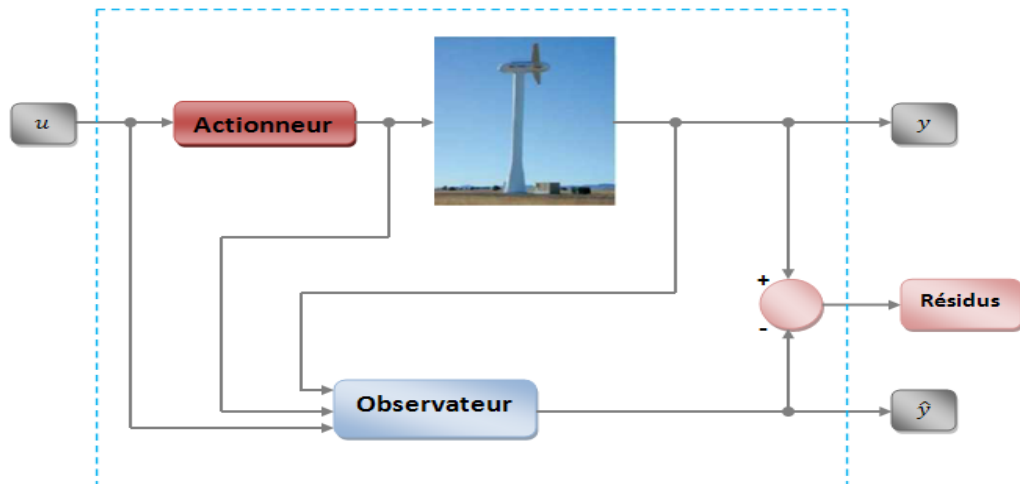
Considérons que les capteurs de mesure des sorties de notre système soient défaillants. Le schéma de la figure III.6 montre le principe du diagnostic de ces capteurs.



**Fig. III.6** – Schéma de la génération des résidus dans le cas des défauts capteurs.

### III.6.3 Diagnostic des défauts actionneurs

Supposant à présent que le système dont les actionneurs peuvent être affectés par des défauts, le principe du diagnostic de ces actionneurs est donné par la figure III.7.



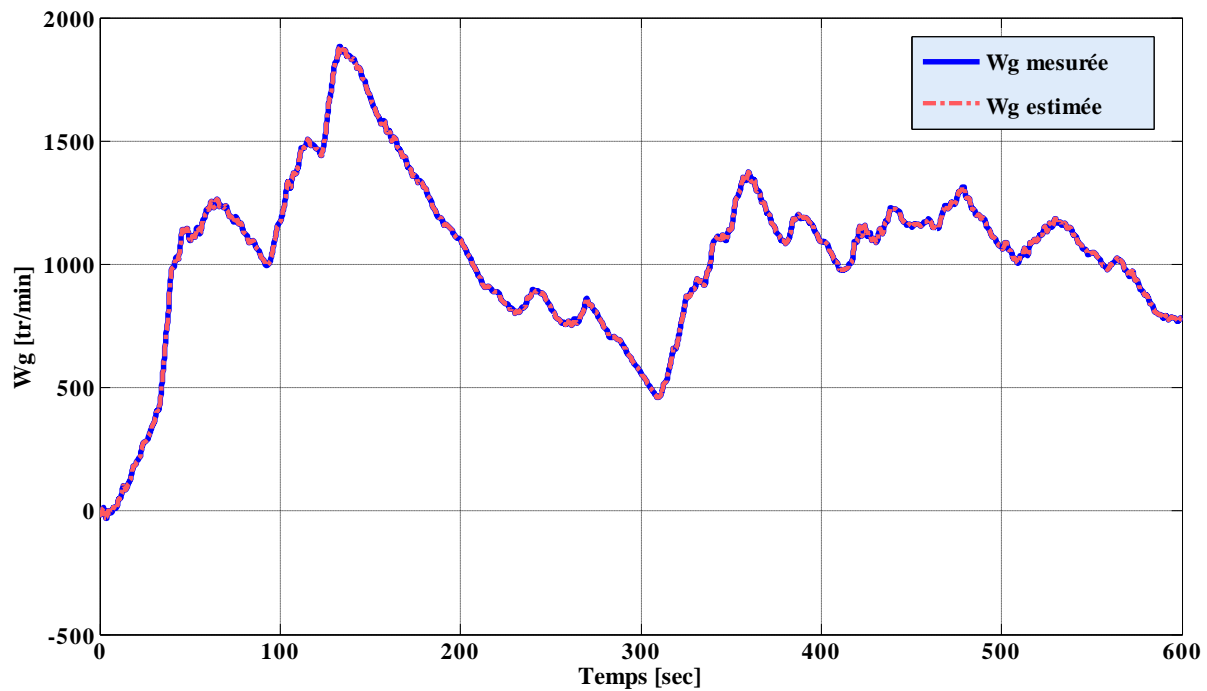
**Fig. III.7** – Schéma de la génération des résidus dans le cas des défauts actionneurs.

### III.7 Résultats du diagnostic

Nous exposerons dans cette section la simulation des différents défauts étudiés. En effet l'évolution de la sortie, qui est la vitesse de la génératrice, est représentée dans le cas de chaque défaut et comparée à celle du modèle nominal ainsi que les résidus appropriés.

#### III.7.1 Cas sans défaut

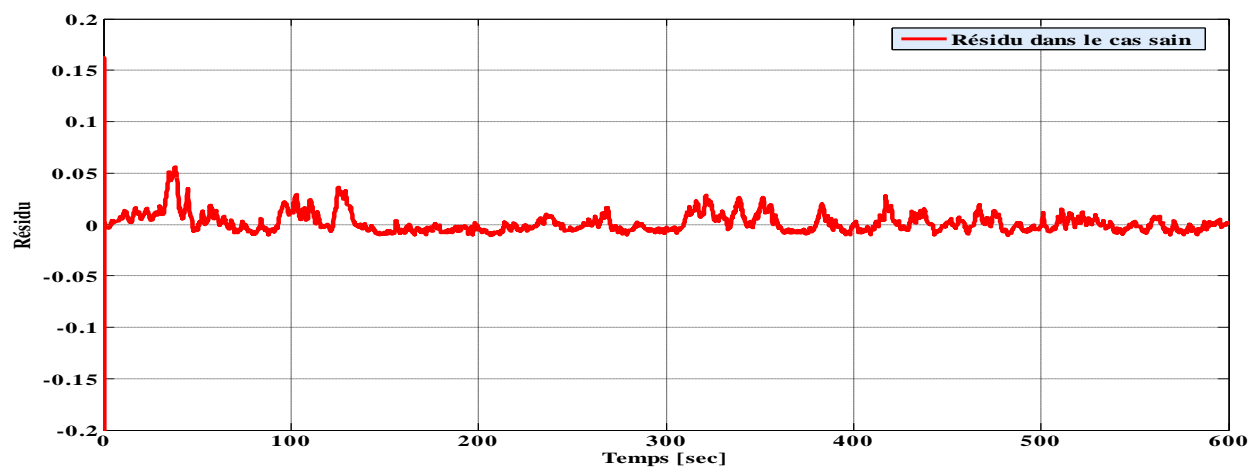
Les figure III.8 et III.9 illustrent l'évolution du signal de sortie et de son estimé, ainsi que du résidu généré respectivement.



**Fig. III.8** – Evolution de la sortie et de son estimée dans le cas nominal.

On voit bien qu'en absence de défaut, le signal estimé suit parfaitement celui de la sortie ; cela revient au choix de l'observateur adéquat qui est traduit donc par l'adoption d'un bon gain d'observateur.

La figure suivante montre l'estimation de l'erreur de sortie.

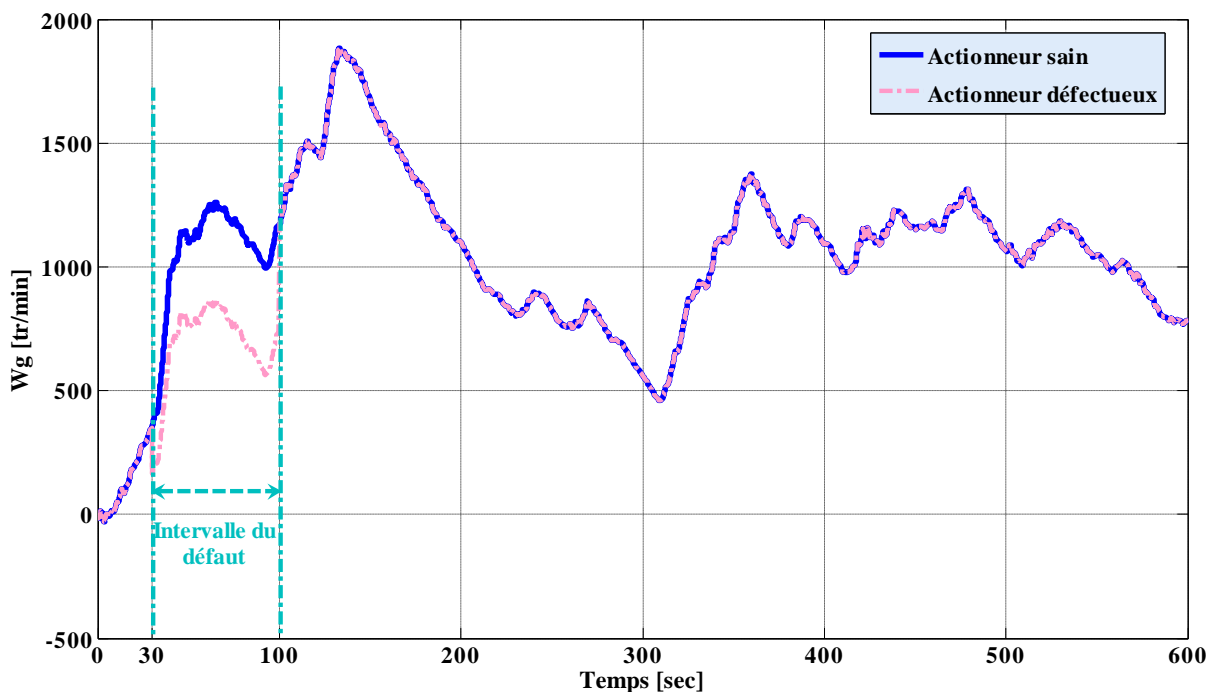


**Fig. III.9** – Estimation de l'erreur de sortie (cas nominal).

Ce résidu qui est approximativement nul, ou ne diverge pas de la valeur zéro, conclut sur le fonctionnement sain du système.

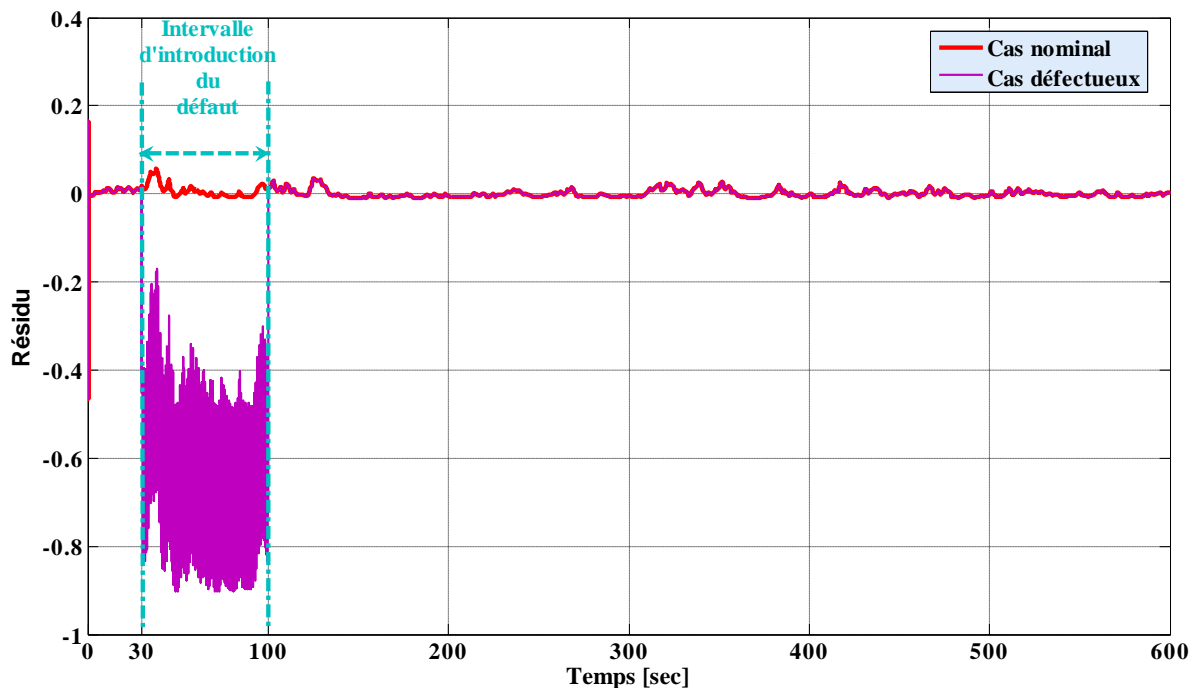
### III.7.2 Cas du premier défaut actionneur

Le premier défaut pouvant affecter le sous-système des pales, est un défaut actionneur agissant sur le système hydraulique qui entraîne la première pale ; ce défaut est dû à une chute de pression, il est présent tout au long de l'intervalle [30s, 100s]. La figure III.10 montre comment la sortie  $\omega_g$  est affectée par ce défaut.



**Fig. III.10** – Evolution de  $\omega_g$  en configuration nominale et défectueuse.

Le résidu de détection et d'isolation du défaut est donné par la figure III.11



**Fig. III.11** – Résidu de détection et d'isolation du premier défaut actionneur de la première pale.

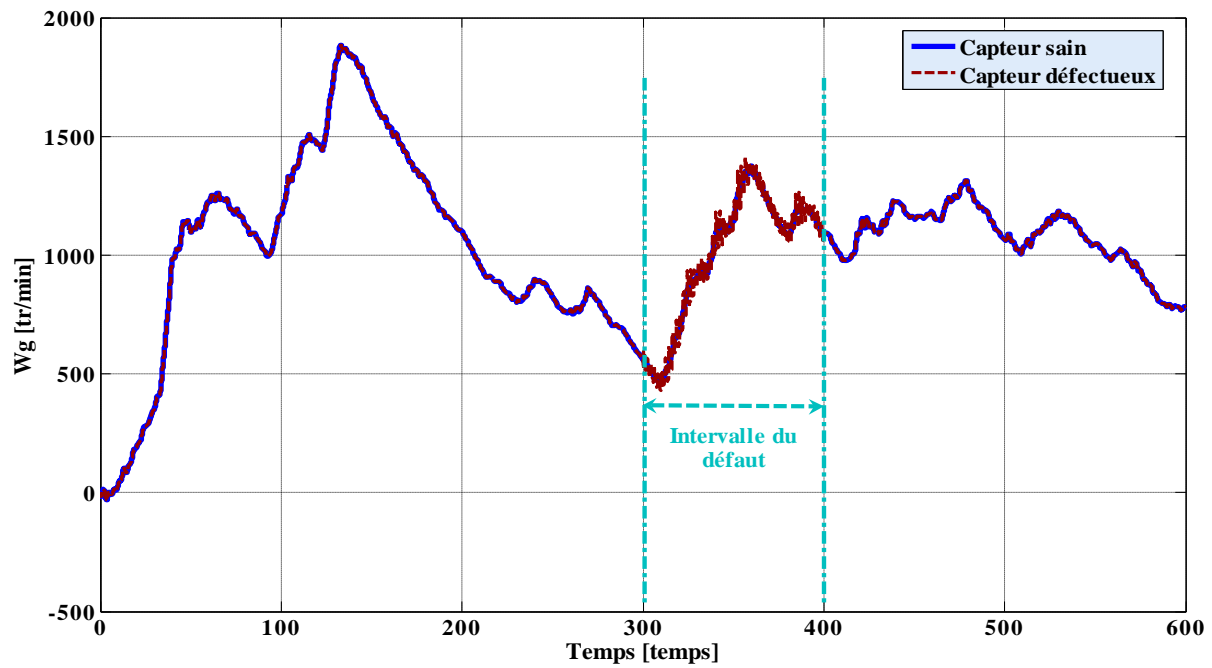
L'apparition d'un résidu significativement non-nul dans l'intervalle [30s, 100s] traduit un fonctionnement anormal ou défectueux dans le système hydraulique de l'actionneur de la première pale.

### III.7.3 Cas du premier défaut capteur

Dans cette partie, les résultats de simulation obtenus sont montrés dans le cas d'application de la procédure de détection au cas d'un défaut affectant le capteur mesurant la vitesse du rotor  $\omega_t$ . Pour la validation, le scénario de défaut suivant est défini :

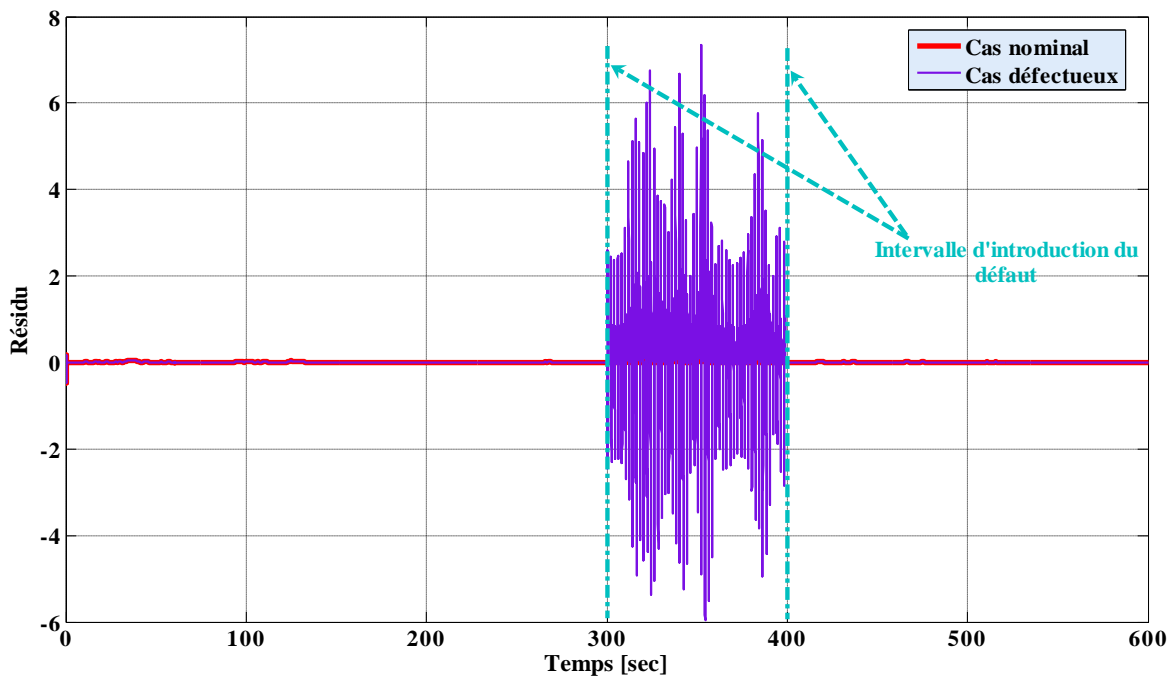
- Augmentation des frottements qui sont dus à l'accroissement d'effort et une forte torsion sur l'arbre lent.
- Ce défaut intervient dans l'intervalle 300-400s.

La figure III.12 illustre l'évolution de la vitesse de la génératrice en présence de ce défaut et sa comparaison au cas nominal.



**Fig. III.12** – La vitesse  $\omega_g$  en configuration nominale et en présence du premier défaut capteur.

Le résidu de détection et d'isolation de ce défaut est donné par la figure III.13



**Fig. III.13** – Résidu de détection et d'isolation du premier défaut capteur.



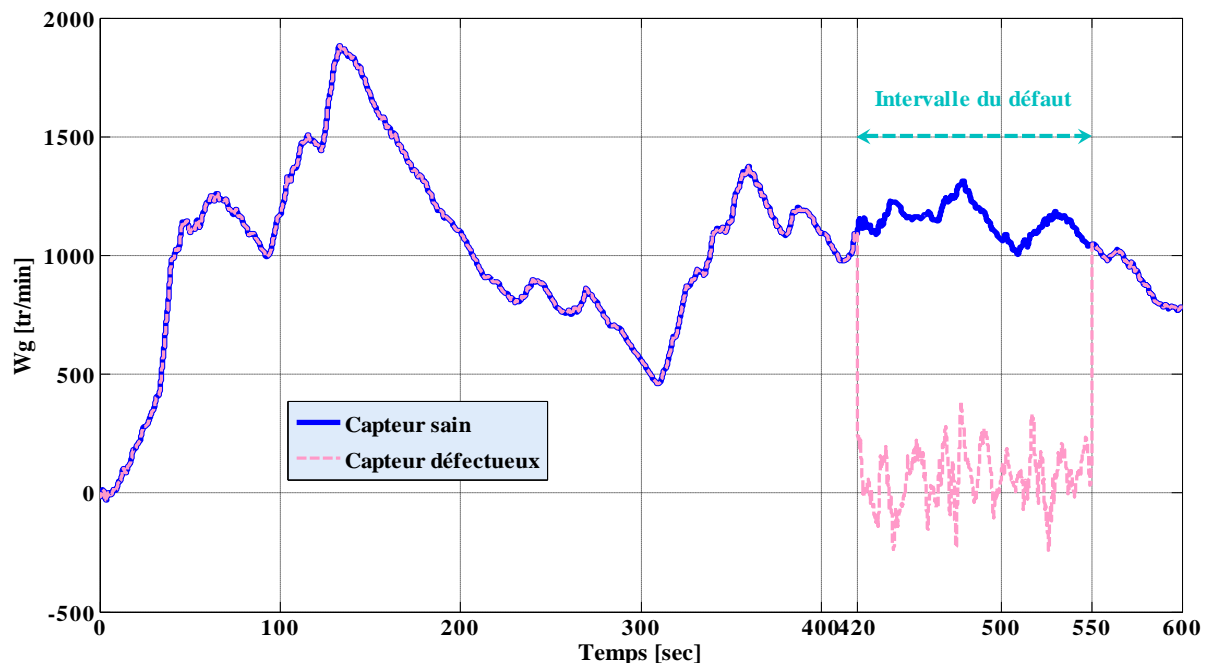
Il est clair que ce défaut capteur introduit entre 300 s et 400 s est détecté et bien isolé puisqu'il est sous l'hypothèse qu'un seul défaut peut surgir. On remarque que la détection est réalisée instantanément à l'instant 300s et prend rapidement la valeur zéro après la disparition de ce défaut à l'instant 400s.

### III.7.4 Cas du deuxième défaut capteur

Dans cette partie, les résultats de simulation obtenus sont montrés dans le cas d'application de la procédure de détection au cas d'un défaut affectant le capteur mesurant la vitesse de la génératrice  $\omega_g$ . Pour la validation, le scénario de défaut suivant est défini :

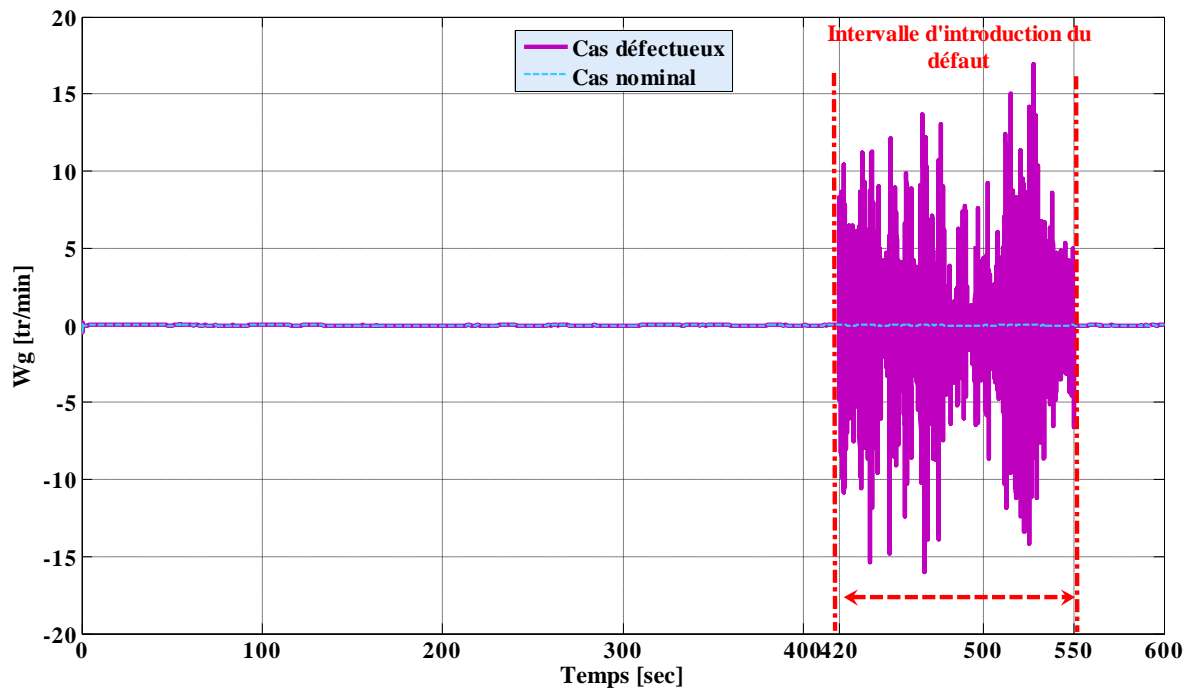
- Augmentation des frottements externes de la génératrice qui sont dus à l'usure de l'arbre rapide.
- Ce défaut intervient dans l'intervalle 420-550s.

La figure III.14 illustre l'évolution de la vitesse de la génératrice en présence de ce défaut et sa comparaison au cas nominal.



**Fig. III.14** – La vitesse  $\omega_g$  en configuration nominale et en présence du deuxième défaut capteur.

Le résidu de détection et d'isolation de ce défaut est donné par la figure III.15



**Fig. III.15** – Résidu de détection et d'isolation du deuxième défaut capteur.

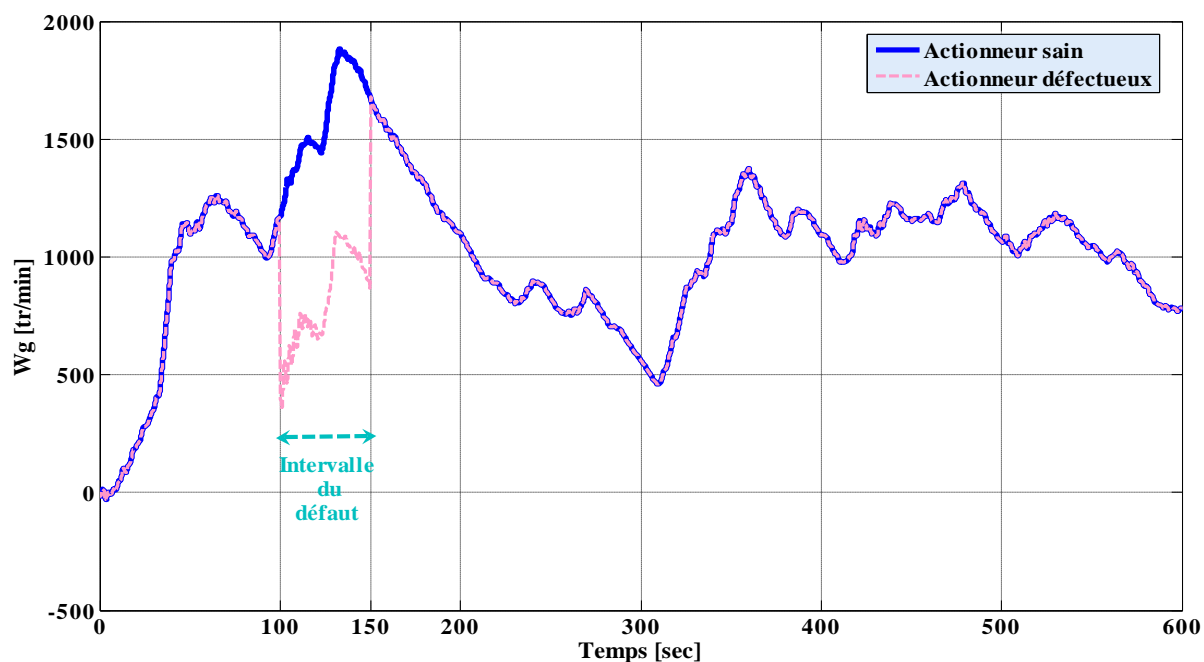
Ce résidu indique l'apparition d'un défaut dans le capteur de la vitesse de la génératrice entre 420s et 550s. On remarque que le résidu diverge de zéro instantanément à l'apparition du défaut et prend rapidement la valeur zéro après la disparition de ce défaut, d'où le défaut est donc isolé sous l'hypothèse faite précédemment.

### III.7.5 Cas du deuxième défaut actionneur

Le deuxième défaut pouvant affecter le sous-système des pales est un défaut actionneur agissant sur le système hydraulique qui entraîne la deuxième pale, ce défaut est dû à une haute teneur en air dans l'huile. Il se manifeste par une variation des valeurs de paramètres  $\omega_n$  et  $\zeta$  définis dans le modèle mathématique III.11. Pour la validation, le scénario de défaut suivant est défini :

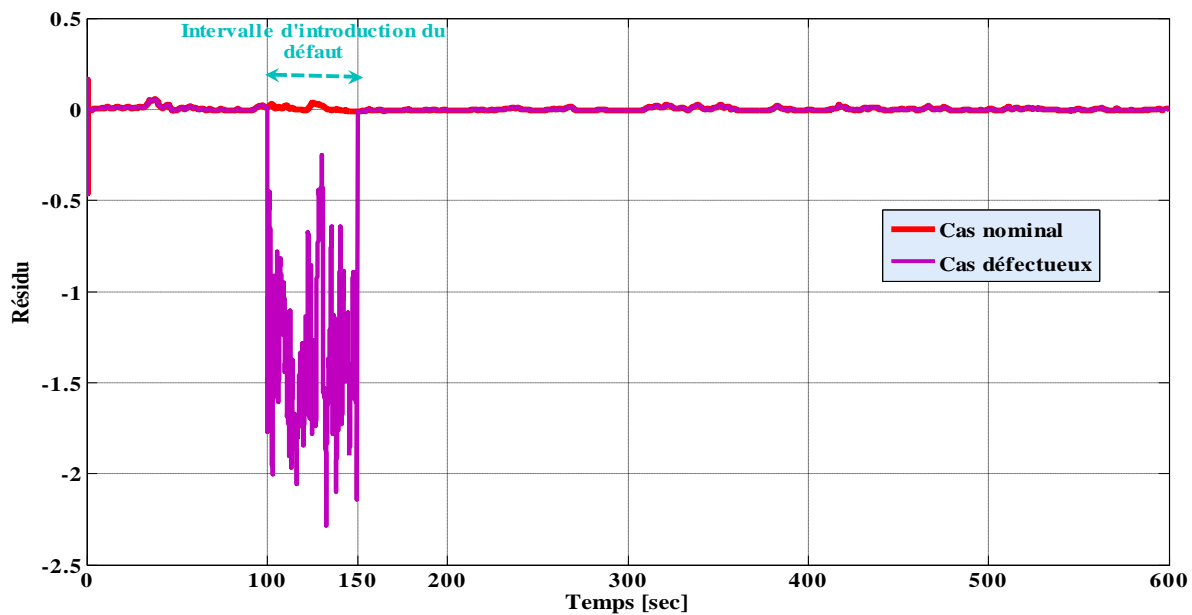
- La haute teneur en air dans l'huile se caractérise par le changement de la dynamique du système hydraulique en passant des paramètres nominaux  $\omega_n$  et  $\zeta$  à  $\omega_{n2} = 3.42$  rad/s et  $\zeta_2 = 0.9$ .
- Ce défaut intervient dans l'intervalle 100-150s.

L'allure de la vitesse de la génératrice en présence du deuxième défaut actionneur ainsi que celle du cas nominal est donné par la figure III.16.



**Fig. III.16** – La vitesse  $\omega_g$  en configuration nominale et en présence du deuxième défaut actionneur de la deuxième pale.

Le résidu qui est défini de la même manière que les défauts précédents est montré par la figure III.17



**Fig. III.17** – Résidu de détection et d'isolation du deuxième défaut actionneur.

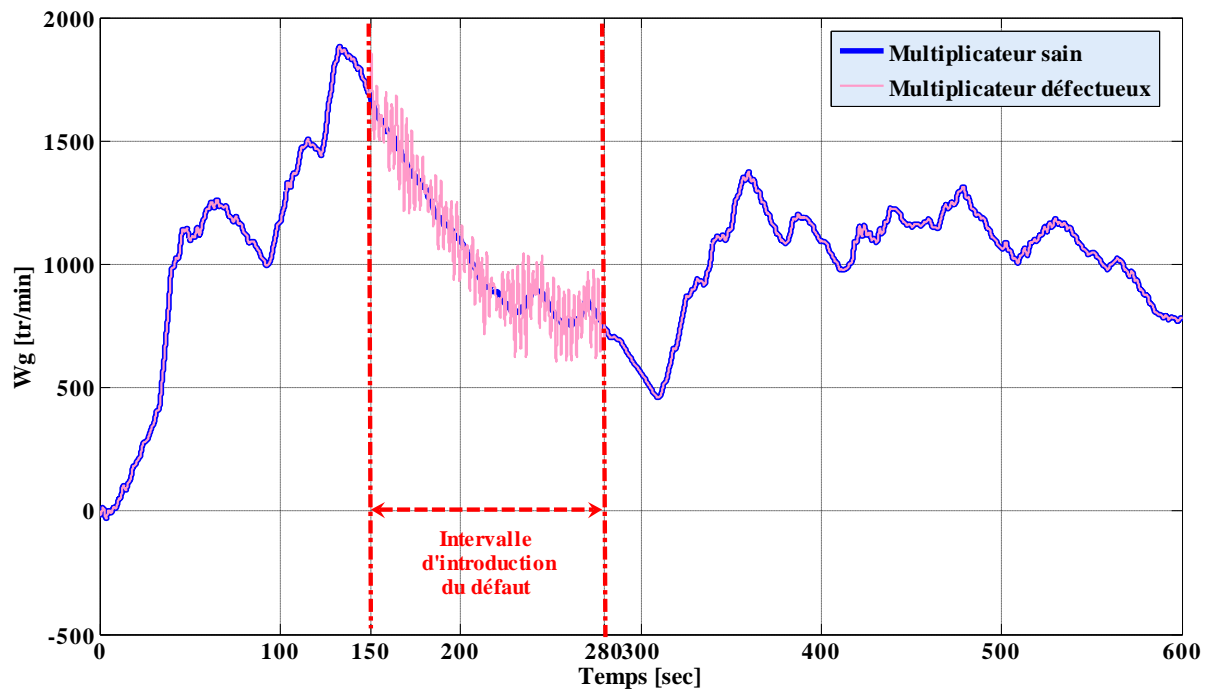
On remarque que le résidu délivré par l'observateur s'éloigne d'une manière significative de zéro entre 100 et 150s, donc il est sensible au défaut. A la fin du défaut, le résidu prend une valeur moyenne sensiblement nulle, et grâce aux hypothèses placées précédemment, on a pu isoler le défaut.

### III.7.6 Cas du défaut système

Enfin, le dernier défaut est un défaut système dans la chaîne de transmission présentée par le bloc 2 de la figure III.2. Pour la validation, le scénario de défaut suivant est défini :

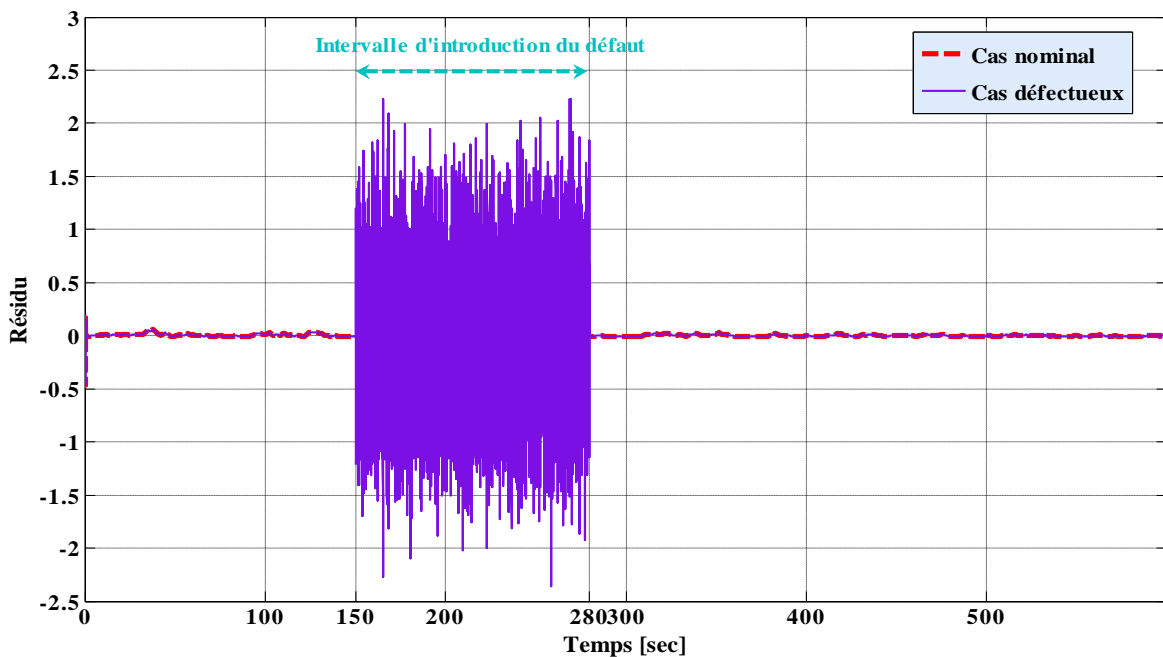
- Usure des roulements du multiplicateur qui est due à la variation des frottements dans le temps.
- Ce défaut intervient dans l'intervalle 150-280s.

L'allure de la vitesse de la génératrice en présence du défaut système et sa comparaison par rapport au cas nominal est présentée dans la figure III.18.



**Fig. III.18** – La vitesse  $\omega_g$  en configuration nominale et en présence d'un défaut système.

Le résidu caractérisant ce défaut système est donné comme les résidus précédents et présenté par la figure III.19



**Fig. III.19** – Résidu de détection et d'isolation du défaut système.

Comme pour les deux défauts précédents, le résidu de détection et sous les hypothèses précédentes donc aussi d'isolation a été défini ; en effet, sa présence indique une faiblesse dans la chaîne de transmission, ce qui peut entraîner son claquage total. Le résidu diverge de zéro rapidement entre 150 et 280s, il est sensible donc au défaut. Le résidu reprend sa valeur nulle après disparition du défaut.

### III.8 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, d'où les pales de la turbine éolienne jouent un rôle très important dans la chaîne de conversion d'énergie.

Dans ce chapitre, le problème de diagnostic des défauts dans un modèle d'une turbine éolienne est abordé, et à cet effet, nous avons présenté un modèle simplifié de l'éolienne sous forme de blocs, ainsi avons-nous décrit chaque partie du modèle pour avoir enfin choisi quelques défauts à détecter, à savoir : deux défauts actionneurs, deux défauts capteurs, et un défaut système.

L'accent a été mis sur une méthode simple et en même temps efficace, à savoir ; le diagnostic à base d'observateur d'état complet qui s'avère être une méthode compétente. Cet observateur donne de bonnes performances grâce à une 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, pour enfin, tous les défauts auraient été détectés.



# *Conclusion Générale*

## ***Conclusion générale et perspectives***

Le travail présenté dans ce mémoire aborde une technique de détection et d'isolation de défauts dans un système éolien, et ce à base d'un modèle à savoir : l'éolienne CART 2 de NREL (National Renewable Energy Laboratory)

La détection et la surveillance de défauts dans les éoliennes est un moyen d'éviter la progression d'événements anormaux, et de réduire la perte de productivité, les pannes de systèmes et les dommages. Il augmente la sécurité et la fiabilité du système pour atteindre des performances plus élevées.

Les défauts potentiels possibles des éoliennes peuvent se produire dans leur boîte de vitesses, leurs pales, leurs capteurs, les moteurs de lacet du rotor. Ces défauts provoquent des temps d'arrêt importants. L'entretien d'une éolienne, où ces défauts sont apparus, est en fait un grand défi pour les praticiens industriels, en particulier pour les grandes éoliennes en mer. Le défi peut réellement être attribué à la difficulté et même au danger d'accès aux turbines. Cela nécessite donc la disponibilité de la détection automatique, l'isolation des défauts et la reconfiguration du système de contrôle en conséquence. Ce qui est assuré par l'introduction d'un système perfectionné pour la détection et l'isolation des défauts dans les éoliennes.

Un système industriel qui a un fonctionnement sûr doit pouvoir fonctionner sans causer de dommages pour et autour de lui ; améliorer leurs performances en termes de sûreté de fonctionnement conduit alors à l'élaboration de systèmes de surveillance qui réalisent trois tâches consécutives, à savoir : la détection, l'isolation et l'identification.

- La détection consiste à indiquer si le système fonctionne correctement ou si un défaut est survenu ;
- L'isolation vise à déterminer la partie défectueuse du système ;
- L'identification consiste en la détermination du type de défaut afin de mettre en œuvre le type de maintenance (corrective ou préventive) approprié au défaut.

### **Perspectives**

Dans certains systèmes complexes, la phase de détection et de localisation d'un ou de 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 nécessaire d'associer au diagnostic une loi de commande tolérante aux défauts.

La commande tolérante 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. La conséquence est d'éviter l'arrêt immédiat du système et de permettre son fonctionnement en mode dégradé.



# ***Bibliographie***

- [1] <http://www.kasciope.org/>
- [2] FREDERIC. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau) », Thèse de Doctorat de génie électrique, Université Nantes, France, 2003.
- [3] <http://www.gwec.net/>
- [4] PASCAL MONJEAN, « Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et onshore équipées de liaisons en continu », Doctorat Paris-Tech, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2012.
- [5] IGROUFA RABIAA, « commande adaptative et robuste appliquée sur une éolienne », mémoire de Master, université de Bejaia ,2012
- [6] MUKUND R. PATEL, « Wind and Solar Power Systems », Second Edition.
- [7] BOUBEKEUR BOUKHEZZAR, thèse de doctorat sur « les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable », université paris XI , 2006
- [8] 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.
- [9] SELMA EL AIMANI, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille , université des sciences et technologies de Lille ,2004.
- [10] Yao X., Liu Y., GUO C. « Adaptive fuzzy sliding mode control in variable speed adjustable pitch wind turbine », Proc. IEEE. International Conférence on Automation and Logistics, 2007.
- [11] NADHIRA KHEZAMI, « Commande multi-modèle optimale des éoliennes : Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, université des sciences et technologies de Lille, 2011.

- [12] Alan D. Wright, Lee J. FINGERSH, and Karl A. STOL, « Testing Controls to Mitigate Fatigue Loads in the Controls Advanced Research Turbine », 17th Mediterranean Conference on Control & Automation MAKEDONIA Palace, Thessaloniki, Greece June 24 - 26, 2009.
- [13] POITIERS F., Machmoum M., and Le DoeuffR. « Simulation of wind energy conversion system based on a doubly-fed induction generator ». In 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France, September 2003.
- [14] A.S. WILLSKEY. A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems, Automatica, 1976.
- [15] G. ZWINGELSTREIN. Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels, Edition Hermès, 1995.
- [16] NAIT SLIMANI BOUKHALFA, « synthèse d'observateurs non linéaires : application au diagnostic de défauts. », Mémoire de magister, université de Tizi-Ouzou.
- [17] BOUDJEMAI FOUJIL, « Méthodes non-intrusives pour le diagnostic des défauts mécaniques d'une éolienne », mémoire de Master, université A. Mira de Bejaia, 2012.
- [18] Michel BATTEUX, « Développement d'une chaîne de conception outillée d'un système de diagnostic appliquée aux systèmes technologiques pilotés », ÉCOLE DOCTORALE INFORMATIQUE PARIS-SUD Laboratoire de Recherche en Informatique.
- [19] Petropol, S. Ondelettes et diagnostic, application aux défauts diélectriques et électriques des machines tournantes, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France, 2001.
- [20] Youssef, B. Diagnostic par signatures graphiques des systèmes non linéaires, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, 2005.
- [21] Dubuisson, B. Diagnostic et reconnaissance de formes, Hermès Sciences Publications, Paris, 1990.

- [22] DUBUISSON, B. Automatique et statistiques pour le diagnostic, Hermès Sciences Publications, Paris, 2001a.
- [23] K. HORNIK [1991], « Approximation capabilities of multilayer feedforward networks », *Neurol Networks* 4(3), 251–257.
- [24] CYBENKO, G. « Approximation by superposition of a sigmoidal function », *Maths, control, signal, Systems* 2, 303–314, 1989.
- [25] BROOMHEAD, D. S. & LOWE, D. « Multivariable functional interpolation and adaptive networks », *Complex Systems* 2, 321–355, 1988.
- [26] Chen, J. & Patton, R. « Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems », 1999.
- [27] R. BEARD, V. Failure accommodation in linear systems through self reorganization. Rept. MTV-71-1 Man Vehicle Laboratory, MIT. 1971
- [28] DIMITRIOS FRAGKOULIS, « Détection et localisation des défauts provenant des capteurs et des actionneurs : application sur un système non linéaire », l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [29] RAY, A. & DESAI, M. « A redundancy management procedure for fault detection and isolation », *Journal of dynamic systems, measurement and control* 108(3), 248–254, 1986.
- [30] Fagarasan, I. & Iliescu, S, Parity equations for fault detection and isolation, in « IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR) », pp. 99–103. 22-25 May.
- [31] ISERMANN, R. « Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing: tutorial paper », *Automatica* 29(4), 815–835, 1993.
- [32] BESANÇON, G. *Nonlinear Observers and Applications*, Springer, 2007.
- [33] Benoît LARROQUE, « Observateurs de systèmes linéaires Application à la détection et localisation de Fautes », THESE présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Université de Toulouse ; Ecole Doctorale Systèmes, 2008.

- [34] WANG, S., E. J. DAVISON, and P. Dorato, Observing the states of systems with unmeasurable disturbances. IEEE Transactions on Automatic Control 20 (5), pp. 716–717, 1975.
- [35] LUENBERGER, D. An introduction to observers. IEEE Trans. Automatic Control, 1971.
- [36] O'REILLY, J. Observers for linear systems, volume 170. Mathematics in science and engineering, 1983.
- [37] NASSIM LAOUTI, « Diagnostic de défauts par les Machines à Vecteurs Supports : application à différents systèmes mutivariabiles non linéaires » thèse de l'université de LYON, 2006.
- [38] Alan D. Wright, Lee J. FINGERSH, and Karl A. STOL, « Testing Controls to Mitigate Fatigue Loads in the Controls Advanced Research Turbine », 17th Mediterranean Conference on Control & Automation MAKEDONIA Palace, Thessaloniki, Greece June 24 - 26, 2009.
- [39] SATADRU DEY, Student Member, IEEE, PIERLUIGI PISU, Member, IEEE, and BESHAH AYALEW, « A Comparative Study of Three Fault Diagnosis Schemes for Wind Turbines », IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY.
- [40] Hector Sanchez, Teresa Escobet, Vicenç Puig, and Peter Fogh Odgaard, Senior Member, « Fault Diagnosis of an Advanced Wind Turbine Benchmark Using Interval-Based ARRs and Observers », IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 62, NO. 6, JUNE 2015.
- [41] JIHONG LIU, DAPING XU, XIYUN YANG, « Sensor Fault Detection in Variable Speed Wind Turbine System Using  $H_2/H_\infty$  Method », Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, June 25 - 27, 2008.
- [42] Adegas F., Sloth C., Stoustrup J., Structured Linear Parameter Varying Control of Wind Turbines, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp.303-337, 2012.



# *Annexe*

## Paramètres de l'éolienne CART

### L'éolienne CART

L'éolienne CART (Controls Advanced Research Turbine) est installée sur le site du NWTC (National Wind Technology Center). Elle est à axe horizontal avec un mât de 35 m et possède deux pales



Fig.1 - L'éolienne CART au NWTC, Golden, Colorado.



Paramètre	Signification
Diamètre du rotor	43.3 m
Rapport de transmission	43.165
Hauteur du moyeu	36.6 m
Puissance électrique nominale	600 kW
Vitesse nominale du rotor	42 tr/min
Couple maximal du générateur (coté arbre lent)	162 kN.m
Vitesse Maximale du rotor	53 tr/min
Vitesse Maximale du système de calage	19°/s
Maximum de l'angle de calage	30°
Minimum de l'angle de calage	-5°

TAB.1 caractéristiques de l'éolienne CART

Paramètre	Signification
$R = 21.65m$	Rayon du rotor
$\rho = 1.29kg/m^3$	Masse volumique de l'air
$J_r = 3.25 * 10^5 kg.m^2$	Inertie des masses de coté du rotor
$J_g = 34.4 kg.m^2$	Inertie des masses du coté de la génératrice
$K_r = 27.36 N.m/rad/s$	Coefficient de frottement visqueux externe du rotor
$K_g = 0.2 N.m/rad/s$	Coefficient de frottement visqueux externe de la génératrice
$K_{ls} = 9500 N.m/rad/s$	Coefficient de frottement visqueux interne de l'arbre lent
$B_{ls} = 2.691 * 10^5 N.m/rad$	Coefficient de torsion de l'arbre lent
$n_g = 43.165$	Rapport de transmission du multiplicateur

TAB.2 Paramètres du modèle à deux masses

## Résumé

L'énergie éolienne 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 qui sont susceptibles de causer des dommages et de réduire ses performances ou même de provoquer un arrêt total de l'installation. Par conséquent, les méthodes de diagnostic de défauts sont nécessaires. Dans ce travail, afin d'anticiper l'apparition d'un dysfonctionnement, soit pour les éviter ou afin de limiter les conséquences, nous avons utilisé une technique de diagnostic de défaut à base de modèle pour détecter et isoler les défauts capteurs et actionneurs dans les pales et le système d'orientation de l'éolienne. Il s'agit d'un observateur appliqué sur un modèle "de Benchmark" pour la détection et l'isolation des défauts (FDI) dans une éolienne, les résultats de la simulation par MATLAB / Simulink sont présentés pour valider l'efficacité de cette méthode de diagnostic.

## Abstract

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