



HAL
open science

Contribution au Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée de l'Eolienne à Vitesse Variable.

Imane Idrissi

► **To cite this version:**

Imane Idrissi. Contribution au Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée de l'Eolienne à Vitesse Variable.. Energie électrique. Normandie Université; Université Sidi Mohamed ben Abdellah (Fès, Maroc), 2019. Français. NNT : 2019NORMR033 . tel-02307160

HAL Id: tel-02307160

<https://theses.hal.science/tel-02307160>

Submitted on 7 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE EN CO - TUTELLE INTERNATIONALE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Génie Électrique

Préparée au sein de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc et l'Université de Rouen Normandie

Contribution au Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée d'une Éolienne à Vitesse Variable

Présentée et soutenue le 21 Septembre 2019 par
M^{lle} Imane IDRISSE

Thèse soutenue publiquement le (date de soutenance) devant le jury composé de		
M / Ahmed EL HAJJAJI	Professeur à l'Université de Picardie Jules Verne, Amiens, France	Rapporteur
M / Mohamed SALHI	Professeur à l'ENSAM, Moulay-Ismaïl, Meknès, Maroc	Rapporteur
M / Abdellatif SAFOUANE	Professeur à l'Université Euro-Méditerranéenne de Fès, Maroc	Examineur
M / Khalid LOUDIYI	Professeur à l'Université Al Akhawayn, Ifrane, Maroc.	Examineur
Mme / Najia ESSBAI	Professeur à la FST, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc	Examinatrice
M / Dimitri LEFEBVRE	Professeur à l'Université du Havre/Normandie Université, France	Examineur
M / Houcine CHAFOUK	Professeur à l'ESIGELEC, Université de Rouen Normandie, France	Directeur de thèse en France
M / Rachid EL BACHTIRI	Professeur à l'EST, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc	Co-Directeur de thèse au Maroc

Thèse dirigée par

M. Houcine CHAFOUK
M. Rachid EL BACHTIRI

Université de Rouen Normandie, IRSEEM (EA 4353)
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, LPERE



CED : Sciences et
Techniques de
l'Ingénieur

Laboratoire : Procédés,
Energies Renouvelables
et Environnement (PERE)

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail,

- À mon cher papa Mohamed et ma chère maman Soad pour leurs prières, leur bénédiction et pour l'amour sincère et profond qu'ils m'éprouvent tout le temps.
- À ma chère sœur Maryem, à mon aimable frère Abdessamad et à mon amie intime Meryem d'avoir été toujours présents à mes côtés dans les moments joyeux et tristes.
- À ma chère tante Lalla Laziza, ma deuxième maman, envers son fils Hallan-Oiassim, mon cousin adoré et envers son mari Ange Emmanuel, mon cher oncle... Merci beaucoup ma deuxième famille pour tous vos encouragements, votre affection, votre soutien et surtout votre amour inconditionnel.
- À tous les membres de ma famille sans exception, je vous aime beaucoup et je vous offre ce modeste travail.

Finalement, la louange est à Allah de par la grâce de qui se réalisent les bonnes choses.

الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي بِنِعْمَتِهِ تَتِمُّ الصَّالِحَاتُ

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués dans le cadre d'une convention de cotutelle de thèse entre l'Université de Rouen Normandie, France et l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc et ont été codirigés par Monsieur Rachid EL BACHTIRI, Professeur de l'Enseignement Supérieur à l'École Supérieure de Technologie (EST), Fès, Maroc et Directeur du laboratoire Procédés, Énergies renouvelables et Environnement (PERE) et par Monsieur Houcine CHAFOUK, Dr. HDR à l'École Supérieure d'Ingénieurs en Génie Électrique (ESIGELEC), Rouen, France. Je tiens à remercier vivement et à exprimer ma gratitude envers mes directeurs de thèse pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me permettant d'effectuer mes travaux de recherche sous leur direction et d'avoir toujours assuré l'avancement et la continuité de la thèse par leurs conseils et leur soutien qui m'ont été utiles pour l'achèvement de cette thèse.

Mes sincères remerciements vont à Monsieur Ahmed EL HAJJAJI, Professeur à l'Université de Picardie Jules Verne, Amiens, France et à Monsieur Mohamed SALHI, Professeur à l'ENSAM-Université Moulay Ismaïl, Meknès, Maroc, d'avoir accepté d'être rapporteurs de mes travaux.

J'exprime également mes vifs remerciements à Madame Najia ES-SBAI, Professeur à la FST, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc ; Monsieur Abdellatif SAFOUANE, Professeur à l'Université Euro-Méditerranéenne de Fès, Maroc ; à Monsieur Khalid LOUDIYI, Professeur à l'Université Al Akhawayn, Ifrane, Maroc et à Monsieur Dimitri LEFEBVRE, Professeur à l'Université Le Havre Normandie, France, d'avoir accepté de participer à cet honorable jury et d'examiner ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements au Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Formation des Cadres (MESRSFC), représenté par le Centre National de la Recherche Scientifique et Technique (CNRST) et l'Institut Français au Maroc représenté par Campus France, d'avoir soutenu notre projet de recherche et de m'avoir assuré le financement pour mener à bien mon doctorat, en particulier pour séjourner à l'IRSEEM. À cette occasion, je tiens à exprimer ma très vive reconnaissance envers Monsieur Nicolas LANGLOIS, Enseignant Chercheur HDR, directeur de la formation par la recherche et responsable du pôle A&S, pour son accueil et son hospitalité et envers tous mes ex-collègues du laboratoire : Marwa TURKI, Kawthar ALAMEH, Chadia LACHKAR, Ahmed BOUFERTELLA, Lavinius-loan GLIGA, Houssam MOUMOUH et Khaled BENKHOUD pour leur aide, leur sympathie et leurs conseils...Merci à vous toutes et tous.

Mes profonds remerciements s'adressent aussi à mes collègues du laboratoire PERE : Maha KHANFARA et Naoufal EL YOUSSEFI, avec lesquels j'ai partagé des moments de joie, de stress, de rires et d'amitié...je vous remercie de tout mon cœur.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I État de l'Art sur l'Énergie Éolienne & sur les Méthodes de Diagnostic des Défauts	4
Introduction	4
1^{ère} Partie : État de l'art sur la conversion d'énergie éolienne	5
I.1.1 Situation du marché de l'énergie éolienne	5
I.1.1.1 Dans le monde	5
I.1.1.2 Dans l'Union Européenne	6
I.1.1.3 Au Maroc	7
I.1.2 Notions de base sur l'énergie éolienne	8
I.1.3 Principe de conversion de l'énergie éolienne	11
I.1.4 Classification des éoliennes	12
I.1.4.1 Selon la localisation	12
a. Les éoliennes terrestres « Onshore » & en pleine mer « Offshore »	12
b. Les éoliennes volantes « Farshore »	12
I.1.4.2 Selon la disposition géométrique de l'axe du rotor	14
a. Éolienne à axe vertical	14
b. Éoliennes à axe horizontal	16
I.1.4.3 Selon la taille de l'éolienne	17
I.1.4.4 Suivant le régime de fonctionnement	18
I.1.4.5 Selon le secteur d'utilisation	18
I.1.4.6 Selon le mode de régulation de la vitesse de la turbine	18
a. Les éoliennes à vitesse fixe :	18
b. Éolienne à vitesse variable	22
I.1.5 Constitution d'une éolienne à axe horizontal	26
I.1.5.1 Les pales du rotor	26
I.1.5.2 La nacelle	27
I.1.5.3 Le système d'orientation	27
I.1.5.4 Le mât	28
I.1.5.5 La fondation du mât	28
2^{ème} partie : État de l'art sur le diagnostic des défauts	30
I.2.1 Terminologie relative au diagnostic	30
I.2.2 Étapes de la procédure de diagnostic	33

I.2.3	Classification des défauts	34
I.2.3.1	Selon la localisation du défaut	34
a.	Défauts capteurs	34
b.	Défauts actionneurs	35
c.	Défauts composants	36
I.2.3.2	Selon l'évolution temporelle du défaut	36
I.2.3.3	Selon leur impact sur les performances du système :	37
I.2.4	Classification des méthodes de diagnostic	37
I.2.4.1	Méthodes à base de modèle	39
I.2.4.2	Méthodes sans modèle	43
	Conclusion	47
Chapitre II Modélisation et Commande d'une Éolienne à Vitesse Variable, basée sur une Machine Asynchrone Doublement Alimentée		
II.1	Introduction	48
II.2	Description du système éolien	48
II.3	Modélisation et commande du système éolien	50
II.3.1	Modélisation de la turbine éolienne	50
II.3.1.1	Modélisation du vent	51
II.3.1.2	Modélisation aérodynamique	54
II.3.1.3	Modélisation de la partie mécanique :	57
II.4	Extraction du maximum de puissance du vent M.P.P.T	61
II.4.1	Contrôle M.P.P.T avec asservissement de la vitesse	61
II.4.2	Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse	62
II.5	Modélisation et commande de la MADA	63
II.5.1	Constitution de la MADA	63
II.5.2	Principe de fonctionnement de la MADA	66
II.5.3	Modes de fonctionnement de la MADA :	67
II.5.4	Avantages de la MADA pour l'application éolienne :	68
II.5.5	Modélisation mathématique et contrôle vectoriel de la MADA	69
II.5.5.1	Modèle triphasé de la MADA	69
II.5.5.2	Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park (d, q)	72
II.5.5.3	Commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté	75
II.6	Modélisation des convertisseurs statiques	78
II.7	Résultats des simulations	81

II.8	Conclusion	85
Chapitre III Approches de Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée d'une Éolienne, par les Filtres de Kalman		
III.1	Introduction	86
III.2	Défauts de la MADA	87
III.2.1	Classification des défauts de la machine électrique	87
III.2.2	Statistiques des défauts de la MADA	90
III.3	Diagnostic à base d'observateurs	92
III.3.1	Principe de diagnostic à base d'observateurs	92
III.3.2	Classification des observateurs	96
III.3.3	Notions sur les Filtres de Kalman	97
III.3.3.1	Filtre de Kalman	97
III.3.3.2	Filtres de Kalman non-linéaires	100
III.4	Approches de diagnostic des défauts de la MADA à l'aide des Filtres de Kalman	105
III.4.1	Modèle de la MADA dans le repère stationnaire (α, β), lié au champ tournant	105
III.4.2	Diagnostic des défauts capteurs de courant la MADA	109
III.4.3	Diagnostic des défauts composants de la MADA	122
III.4.4	Diagnostic des défauts actionneurs de la MADA	142
III.5	Conclusion	154
CONCLUSION & PERSPECTIVES		156
LISTE DES PUBLICATIONS		158
ANNEXES		160
ANNEXE A Calcul des régulateurs PI		160
ANNEXE B Transformation de Clark et de Concordia		163
ANNEXE C Modèle Analytique de l'éolienne sous Matlab & Simulink		164
BIBLIOGRAPHIE		167

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : État de l'Art sur l'Énergie Éolienne & sur les Méthodes de Diagnostic des Défauts

Figure I.1 Capacité éolienne cumulée installée dans le monde de 2017 à 2022 [© Statista 2019]	5
Figure I.2 Répartition mondiale du marché éolien en 2017 [EurObserv'ER 2018]	6
Figure I.3 Répartition de la puissance éolienne mondiale fin 2017 [EurObserv'ER 2018]	6
Figure I.4 Structure du système de conversion d'énergie éolienne, connecté au réseau électrique	11
Figure I.5 Éolienne volante conçue par Makani Power [Makanipower 2019]	13
Figure I.6 Prototypage d'éolienne aérienne développé par ALTAEROS [altaeros 2019]	14
Figure I.7 Éoliennes de <i>Darrieus</i> [Boyette 2006]	15
Figure I.8 Aérogénérateur de <i>Savonius</i> [Djeriri 2015], [Boyette 2006]	15
Figure I.9 Aérogénérateur à rotor vertical de type H [Djeriri 2015]	15
Figure I.10 Les éoliennes HAWT (a)- en amont ; (b)- en aval [Djeriri 2015]	17
Figure I.11 Configuration d'une éolienne à vitesse fixe, en mode autonome	19
Figure I.12 Éolienne à vitesse fixe raccordée au réseau [Aimani 2004]	20
Figure I.13 Puissance électrique variable fournie (décrochage aérodynamique)	21
Figure I.14 Génération de puissance électrique nominale par orientation des pales	21
Figure I.15 La puissance mécanique générée par l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation [Ouyessaad 2014]	22
Figure I.16 Convertisseurs statiques de fréquence	23
Figure I.17 Éolienne à vitesse variable basée sur une Machine Asynchrone(MAS)	24
Figure I.18 Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone	24
Figure I.19 Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA	25
Figure I.20 Effet de portance au niveau de la pale grâce à la différence de pression [Renac 2018]	26
Figure I.21 Les composants de la nacelle d'une éolienne [Vestas 2019]	27
Figure I.22 Les fondations des éoliennes Offshore[offshore-stiftung, 2010]	29
Figure I.23 Défaut capteur-Le biais	34
Figure I.24 Défaut capteur- La dérive	34
Figure I.25 La perte d'efficacité	34
Figure I.26 Le blocage	34
Figure I.27 Le défaut de calibrage	35
Figure I.28 L'oscillation	35
Figure I.29 Le blocage	35
Figure I.30 Saturation	35
Figure I.31 Perte d'efficacité	35
Figure I.32 Défaut abrupt	37
Figure I.33 Défaut graduel	37
Figure I.34 Défaut intermittent	37
Figure I.35 Techniques de diagnostic des défauts [Chafouk 2016]	38
Figure I.36 Schéma de génération du résidu par l'espace de parité [Chafouk, 2016]	40
Figure I.37 Approche de génération de résidus par l'estimation paramétrique [Chafouk 2016]	41
Figure I.38 Principe de génération d'un résidu par observateur [Chafouk 2016]	41

Figure I.39 La structure des observateurs et leur conception [Chafouk 2016].....	42
Figure I.40 Techniques en ligne de diagnostic des défauts [Zhou 2019]	44

Chapitre II Modélisation et Commande d'une Éolienne à Vitesse Variable, basée sur une Machine Asynchrone Doublement Alimentée

Figure II.1 Architecture d'une éolienne à vitesse variable basée sur une MADA	49
Figure II.2 Schéma de la turbine éolienne.....	51
Figure II.3 Schéma de reconstruction du profil du vent par le filtrage du bruit blanc	53
Figure II.4 Les courbes des coefficients de puissance selon le type de machine et selon leur coefficient de vitesse spécifique λ	55
Figure II.5 Les courbes des coefficients de puissance selon l'angle de calage des pales β et selon le facteur de vitesse spécifique λ	55
Figure II.6 Schéma bloc de la partie aérodynamique.....	57
Figure II.7 Modèle du multiplicateur	58
Figure II.8 Schéma bloc du multiplicateur.....	58
Figure II.9 Modèle de la partie mécanique de l'éolienne.....	59
Figure II.10 Schéma bloc de la partie mécanique de l'éolienne	60
Figure II.11 Schéma bloc de l'ensemble de la turbine éolienne	60
Figure II.12 Schéma bloc de la stratégie M.P.P.T.....	61
Figure II.13 Schéma bloc de la commande M.P.P.T sans asservissement de la vitesse mécanique	63
Figure II.14 Schéma descriptif d'une MADA.....	64
Figure II.15 Structure Kramer.....	65
Figure II.16 Structure Scherbius avec convertisseurs MLI.....	65
Figure II.17 Les quatre modes de fonctionnement de la MADA.....	68
Figure II.18 Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique [Caron 1995].....	70
Figure II.19 Les angles du système dans l'espace électrique [Caron 1995]	73
Figure II.20 Schéma bloc de génération des courants rotoriques.....	77
Figure II.21 Schéma bloc de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté	78
Figure II.22 Structure des convertisseurs d'électronique	79
Figure II.23 Principe de la commande MLI.....	79
Figure II.24 Schéma bloc de l'Onduleur.....	80
Figure II.25 Schéma du redresseur.....	81
Figure II.26 Vitesse du vent [m/s].....	82
Figure II.27 Puissance aérodynamique [W].....	82
Figure II.28 Vitesse mécanique [tr/min]	83
Figure II.29 Vitesse de la turbine [rad/s]	83
Figure II.30 Coefficient de puissance C_p	83
Figure II.31 Vitesse relative λ	83
Figure II.32 Courants statoriques triphasés [A]	84
Figure II.33 Zoom sur les courants statoriques triphasés [A]	84
Figure II.34 Courants rotoriques triphasés de la MADA [A]	84
Figure II.35 Zoom sur les courants rotoriques triphasés de la MADA [A].....	84
Figure II.36 Tensions statoriques triphasées de la MADA [V].....	84

Figure II.37 Tensions à la sortie du convertisseur côté de la MADA [V]	84
Figure II.38 Tensions triphasées au rotor de la MADA [V]	85
Figure II.39 Tension du bus continu Vdc [V]	85

Chapitre III Approches de Diagnostic des Défaits de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée d'une Éolienne, par les Filtres de Kalman

Figure III.1 Répartition des pannes dans les machines de moyennes puissances	91
Figure III.2 Pourcentage des défauts selon Thomson	91
Figure III.3 Répartition des pannes selon Bonnett.....	91
Figure III.4 Schéma du principe d'estimation d'état et de sortie d'un système [Trigeassou 2013].....	93
Figure III.5 Le principe de génération des résidus.....	93
Figure III.6 Structure DOS pour le diagnostic des défauts capteurs et actionneurs.....	94
Figure III.7 Schéma GOS pour le diagnostic des défauts capteurs et actionneurs.....	95
Figure III.8 Les résidus directionnels [Methnani 2013].....	95
Figure III.9 Les trois principales catégories d'observateurs [Chahmi, A. 2017]	97
Figure III.10 Schéma-bloc du principe du filtre de Kalman	100
Figure III.11 Erreurs de discrétisation du modèle continu de la MADA.....	109
Figure III.12 Structure de l'approche de diagnostic des défauts capteurs de la MADA d'une éolienne..	110
Figure III.13 Reconstruction des états de la MADA par le filtre de Kalman classique.....	111
Figure III.14 Rang de la matrice d'observabilité	112
Figure III.15 Zoom sur les courants de la MADA issus du modèle LPV et leurs estimations	112
Figure III.16 Évolution des erreurs d'estimation ou de résidus en fonctionnement sain.....	113
Figure III.17 Schéma SOS pour le diagnostic du défaut capteur de la MADA	113
Figure III.18 Résidus du premier scénario de défaut capteur	114
Figure III.19 Signaux des résidus des défauts capteurs multiples et simultanés.....	114
Figure III.20 Structure DOS pour le diagnostic des défauts capteurs de la MADA	115
Figure III.21 Les résidus de l'observateur de Kalman (1)	116
Figure III.22 Les résidus de l'observateur de Kalman (2)	116
Figure III.23 Les résidus de l'observateur de Kalman (3)	117
Figure III.24 Les résidus de l'observateur de Kalman (4)	117
Figure III.25 la structure GOS pour le diagnostic des défauts capteurs de courant de la MADA	118
Figure III.26 Les résidus de l'observateur de Kalman (1)	118
Figure III.27 Les résidus de l'observateur de Kalman (2)	118
Figure III.28 Les résidus de l'observateur de Kalman (3)	118
Figure III.29 Les résidus de l'observateur de Kalman (4)	118
Figure III.30 Les déterminants du test Page Hinkley pour le 1 ^{er} scénario de défaut	121
Figure III.31 Les déterminants des résidus de l'observateur 1	121
Figure III.32 Les déterminants des résidus de l'observateur 2	121
Figure III.33 Les déterminants des résidus de l'observateur 3	121
Figure III.34 Les déterminants des résidus de l'observateur 4	121
Figure III.35 Défaits statoriques [Harir 2009]	123
Figure III.36 Schéma d'une approche de diagnostic basée sur un modèle	125
Figure III.37 Courants statoriques triphasés_ scénario du défaut 1	127
Figure III.38 Courants rotoriques triphasés_ scénario du défaut 1	128

Figure III.39 Signature résiduelle du courant de stator $e_{is\alpha}$	128
Figure III.40 Signature résiduelle du courant de stator $e_{is\beta}$	128
Figure III.41 Signature résiduelle du courant de stator $e_{ir\alpha}$	129
Figure III.42 Signature résiduelle du courant de stator $e_{is\beta}$	129
Figure III.43 Les déterminants obtenus par le test de Page-Hinkley	129
Figure III.44 Valeur déterminée du paramètre μ	130
Figure III.45 L'impact du défaut de court-circuit inter-spires de 1% sur les courants de la MADA	130
Figure III.46 Les signatures résiduelles pour le 2 ^{ème} scénario de défaut.....	131
Figure III.47 Niveau déterminé du paramètre μ (Scénario du défaut 2).....	131
Figure III.48 Les erreurs d'estimation des sorties du système MADA par le FKE.....	135
Figure III.49 Vitesse mécanique de la MADA (Scénario du défaut 1).....	136
Figure III.50 Zoom sur la vitesse mécanique de la MADA (Scénario du défaut 1)	136
Figure III.51 Courant statorique $is\alpha$ (Scénario du défaut 1)	136
Figure III.52 Zoom sur le courant statorique $is\alpha$ (Scénario du défaut 1).....	136
Figure III.53 Courant statorique $ir\alpha$ (Scénario du défaut 1)	137
Figure III.54 Zoom sur le courant statorique $ir\alpha$ (Scénario du défaut 1).....	137
Figure III.55 Vitesse mécanique de la MADA (Scénario du défaut 2).....	137
Figure III.56 Zoom sur la vitesse mécanique de la MADA (Scénario du défaut 2)	137
Figure III.57 Courant statorique $is\alpha$ - Scénario du défaut 2.....	138
Figure III.58 Zoom sur le courant statorique $is\alpha$ - Scénario du défaut 2	138
Figure III.59 Courant rotorique $ir\alpha$ - Scénario du défaut 2.....	138
Figure III.60 Zoom sur le courant rotorique $ir\alpha$ - Scénario du défaut 2	138
Figure III.61 Valeur estimée de la résistance statorique R_s (Scénario 1).....	139
Figure III.62 Valeur estimée de la résistance statorique R_r (Scénario 1).....	139
Figure III.63 Résidus des résistances R_s et R_r générés par le FKE	139
Figure III.64 Signaux des résidus du deuxième scénario de défauts	140
Figure III.65 Signatures binaires du 2 ^{ème} scénario de défauts.....	141
Figure III.66 Signaux des résidus du 3 ^{ème} scénario de défauts	141
Figure III.67 Déterminants des résidus du 3 ^{ème} scénario de défauts	141
Figure III.68 Diagnostic du défaut actionneur unique - Schéma SOS.....	147
Figure III.69 Diagnostic de défauts actionneurs multiples et simultanés - Structure DOS	147
Figure III.70 Zoom sur l'aspect de la tension du stator $vs\alpha$ pendant le défaut $f1$	149
Figure III.71 Zoom sur le courant statorique $is\alpha$ sous le défaut $f1$	149
Figure III.72 Zoom sur le courant statorique $is\beta$ sous le défaut $f1$	149
Figure III.73 Zoom sur l'effet du défaut $f1$ sur le courant rotorique $ir\alpha$	149
Figure III.74 Zoom sur l'impact du défaut $f1$ sur le courant rotorique $ir\beta$	149
Figure III.75 Vitesse angulaire du rotor de la génératrice : (a)- avec présence du défaut $f1$; (b)- absence du défaut $f1$	150
Figure III.76 Les signatures résiduelles pour le premier scénario de défaillance de l'actionneur.....	150
Figure III.77 Résidus de l'observateur UKF (1).....	151
Figure III.78 Résidus de l'observateur UKF (2).....	151
Figure III.79 Résidus de l'observateur UKF (3).....	151
Figure III.80 Résidus de l'observateur UKF (4).....	151
Figure III.81 Zoom sur l'aspect de la tension du stator $vs\alpha$ pendant le défaut $fa1$	152

Figure III.82 Zoom sur l'allure de la tension du stator $vr\beta$ pendant le défaut $fa4$	152
Figure III.83 Résidus de l'observateur UKF (1).....	152
Figure III.84 Résidus de l'observateur UKF (2).....	152
Figure III.85 Résidus de l'observateur UKF (3).....	153
Figure III.86 Résidus de l'observateur UKF (4).....	153
Figure III.87 Résidus de l'observateur UKF (1).....	154
Figure III.88 Résidus de l'observateur UKF (2).....	154
Figure III.89 Résidus de l'observateur UKF (3).....	154
Figure III.90 Résidus de l'observateur UKF (4).....	154

ANNEXES

Figure A.1 Régulation de la vitesse de la MADA avec régulateur PI.....	160
Figure A.2 Schéma bloc des régulateurs PI.....	161
Figure A.3 Schéma bloc de puissance d'un Régulateur PI.....	162
Figure C.1 Partie aérodynamique et mécanique (multiplicateur) de l'éolienne	164
Figure C.2 Schéma Simulink de la turbine.....	164
Figure C.3 Schéma Simulink du multiplicateur	165
Figure C.4 Partie électrique de l'éolienne	165
Figure C.5 Schéma Simulink de la MADA dans le repère (d, q).....	165
Figure C.6 Partie contrôle du rotor de la MADA et contrôle MLI des convertisseurs.....	166

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : État de l'Art sur l'Énergie Éolienne & sur les Méthodes de Diagnostic des Défauts

Tableau I.1 Puissance éolienne installée dans l'Union européenne fin 2017 (en MW) [EurObserv'ER 2018].....	7
Tableau I.2 Puissance éolienne globale installée en (MW) fin 2017 (AFRIQUE & MOYEN ORIENT)...	8
Tableau I.3 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé [Energie 2016]	17

Chapitre II Modélisation et Commande d'une Éolienne à Vitesse Variable, basée sur une Machine Asynchrone Doublement Alimentée

Tableau II.1 Différentes formules numériques du coefficient C_p	56
Tableau II.2 Les paramètres du modèle simulé	82

Chapitre III Approches de Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée d'une Éolienne, par les Filtres de Kalman

Tableau III.1 Les défauts de la machine électrique, leurs causes et leurs effets.....	88
Tableau III.2 Position du défaut de court-circuit inter-spires d'une phase statorique.....	126
Tableau III.3 Scénario de défaut de la résistance R_s	138
Tableau III.4 Scénario de défaut de la résistance R_r	138

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières décennies ont été marquées par une expansion sans précédent de l'industrialisation et par conséquent par une grande croissance de la demande en énergie électrique. De plus, la pénurie des ressources mondiales en hydrocarbures, les risques d'accidents et de pollution liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire (à titre d'exemple : la catastrophe de Tchernobyl du 26 avril 1986) et aussi la prise de conscience environnementale et écologique des populations et des gouverneurs des pays, sont des facteurs qui rendent les sources d'énergie renouvelable plus attractives pour les générations futures surtout en ce qui concerne la production de l'électricité.

Parmi ces sources d'énergie renouvelable, nous trouvons l'éolien qui fait actuellement l'objet d'un vif débat et bénéficie d'un intérêt croissant pour répondre à la demande de plus en plus galopante en énergie électrique. Alors, plusieurs pays ont eu recours aujourd'hui à l'énergie éolienne, en effet, la puissance du parc éolien mondial a atteint 591 GW à fin 2018 selon GWEC, dont la Chine a nouvellement installé près de 45% des nouvelles installations éoliennes dans le monde (+ 23 GW), suivie des États-Unis (+ 7,6 GW) et les pays européens. De plus, le GWEC souligne l'apparition de nouveaux marchés comme l'Amérique latine, l'Asie du Sud-Est et l'Afrique (avec seulement 10% des capacités installées en 2018). En ce qui concerne, le parc éolien européen : il a produit 362 TWh en 2018 (dont 309 TWh par des installations terrestres et 53 TWh par les parcs en mer) selon WindEurope et la puissance totale installée du parc éolien de l'UE s'élevait à 178,8 GW (dont près de 18 GW offshore), 58% de ces capacités étant situées dans 3 pays : l'Allemagne (59,3 GW), l'Espagne (23,5 GW) et le Royaume-Uni (21 GW).

Le principe de l'éolienne est de capter et de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique pour approvisionner en électricité des consommateurs, pour la stocker dans des batteries ou pour l'injecter sur le réseau électrique de distribution. L'énergie éolienne est une source d'énergie propre, non polluante du fait que son utilisation et son exploitation n'émet pas de gaz à effets de serre. Cependant, le comportement difficilement imprévisible et intermittent du vent, la localisation éloignée des installations éoliennes, les hauteurs élevées des nacelles (150 m et plus), le manque de critères et règles de maintenance prédictive et les coûts onéreux de la maintenance réactive de ces installations, la gêne des riverains et le danger pour les espèces animales volantes à proximité, sont autant de problèmes qui freinent le développement et la gestion de ces systèmes énergétiques. Alors, une surveillance rigoureuse des éoliennes s'avère nécessaire, afin d'obtenir un rendement énergétique optimal. Ce suivi doit être capable de détecter les défaillances, de les localiser et de les identifier pour décider les actions de maintenance à entreprendre. Ces différentes étapes, constituant le principe de base du diagnostic des défauts, doivent être exécutées aussi rapidement que possible.

De nos jours, les fermes éoliennes utilisent des aérogénérateurs à vitesses variables avec des Machines Asynchrones Doublement Alimentées (MADA).

Ces Machines asynchrones doublement alimentées (MADA) sont utilisées dans des unités de production supérieure à 1MW. Ce genre de machines présente de nombreux avantages tels que la puissance massique, la robustesse, la facilité de mise en œuvre et le faible coût.

Bien que la machine asynchrone est robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique des défaillances qui peuvent être causées par : des causes internes de défauts : Mécaniques (Frottement Rotor/Stator, Excentricité, Défauts des Roulements...) ; Électriques (Rupture des barres, Défauts statoriques, Défauts d'isolement) et des causes externes de défauts : Mécaniques (Pulsation de couple, Mauvais montage, Surcharge) ; Environnementales (Température, Humidité, Encrassement) ; Électriques (Fluctuation de tension, Transitoire de tension, Déséquilibre de tension). Les machines doivent être dotées de systèmes de diagnostic sûrs et fiables parce qu'une quelconque défaillance, même la plus petite, peut mener à l'endommagement de la machine. Pour éviter ce genre de problèmes, notre travail de thèse a pour objectif de concevoir un système de diagnostic automatique des défauts de la machine asynchrone doublement alimentée d'une éolienne, en se basant sur les observateurs d'état de Kalman, en vue de fournir des informations sur le fonctionnement de la MADA aux opérateurs qui l'exploitent. Ces informations sont issues des capteurs implantés sur les systèmes énergétiques éoliens. Et cela afin de surveiller en permanence la qualité de fonctionnement et l'état de santé des génératrices et de planifier les interventions d'entretien et de maintenance de ces unités de production électrique.

Organisation du mémoire :

Dans ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés aux méthodes de diagnostic à base de modèles de la machine asynchrone doublement alimentée utilisée dans une éolienne. Notre contribution a consisté au diagnostic des défauts capteurs simples et simultanés, des défauts actionneurs et des défauts système de la machine comme le défaut de court-circuit inter-spores des enroulements statoriques et le défaut de variation des valeurs de résistances des enroulements statoriques et rotoriques. En conséquence, le mémoire est composé de trois chapitres structurés de la manière suivante :

Le premier chapitre est partagé en deux parties, la première présente l'état de l'art concernant l'énergie éolienne dans le monde, dans l'union européenne et au Maroc. Elle introduit aussi les notions de base relatives à l'énergie éolienne, elle décrit le principe de fonctionnement des éoliennes et présente les différents types. La deuxième partie porte sur l'état de l'art concernant le diagnostic des défauts. Elle définit les termes rencontrés dans le domaine de diagnostic des défauts et classe ces défauts selon leur localisation, leur évolution temporelle et leur impact sur les performances des systèmes à surveiller. En outre, une classification des méthodes de diagnostic des défauts est établie.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation en utilisant le logiciel MATLAB & Simulink de toute la chaîne de conversion éolienne fonctionnant à vitesse variable et à pas de calage des pales fixe, basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Dans un premier temps, nous décrivons le système éolien et tous les éléments qui le constituent.

Ensuite, nous établissons les équations mathématiques du système de conversion éolienne et de la stratégie de commande MPPT. Dans un second temps, la modélisation mathématique de la MADA et sa commande vectorielle à flux statorique orienté sont présentées. Finalement, les résultats des simulations de l'ensemble du système à l'aide du logiciel MATLAB & Simulink sont montrés.

Le troisième chapitre est consacré à l'élaboration des approches de diagnostic des défauts capteurs, actionneurs et composants de la MADA. Ces approches de diagnostic utilisent les Filtres de Kalman.

Chapitre I État de l'Art sur l'Énergie Éolienne & sur les Méthodes de Diagnostic des Défauts

Introduction

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à l'aide des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. La production de l'électricité à partir de l'énergie éolienne offre de nombreux avantages, à savoir : l'énergie éolienne n'émet aucun gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs, ne pollue pas le sol, l'eau et l'air, ce qui permet de lutter contre le changement climatique et les problèmes environnementaux. En plus, elle garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole, ceci permet aux pays d'atteindre une indépendance énergétique, de se stabiliser socialement et contribue à leur paix. En outre, elle offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et d'éviter les ruptures de courant.

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes : la transformation de l'énergie par les pales, l'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur, la production d'électricité par le générateur. L'électricité produite est ensuite acheminée vers le réseau électrique et dans ce cas elle est traitée par le convertisseur et le transformateur ou elle est consommée localement ou elle alimente des charge isolées (sites isolés). L'énergie éolienne peut être combinée avec d'autres sources d'énergie renouvelable, notamment le solaire. Ce type de système est connu sous l'appellation de « système d'énergie hybride », nécessitant un dimensionnement optimal tenant compte du potentiel du site [Boussetta 2016], [Boussetta 2017] et sur le plan économique [Khanfara 2018].

De nos jours, les éoliennes sont du type à axe horizontal et à vitesse variable, équipées des Machines Asynchrones à Double Alimentations (MADA). Ces dernières présentent de nombreux avantages tels que leur puissance massique, leur robustesse, leur facilité de mise en œuvre et leur faible coût. Bien que cette machine est robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique des défaillances. Alors, afin de surveiller en permanence la qualité de fonctionnement et l'état de santé des machines et en vue de planifier les interventions d'entretien et de maintenance de ces unités de production électrique, notre travail de thèse a pour objectif de concevoir un système de diagnostic des défauts capteurs, actionneurs et composants de la MADA permettant de fournir des informations sur le fonctionnement de la MADA aux opérateurs qui l'exploitent.

Pour se faire, il est question, dans la 1^{ère} partie de présenter la situation de l'énergie éolienne dans le monde entier, dans l'union européenne et au Maroc, de définir les notions de bases relatives

à l'énergie éolienne, de décrire le principe de fonctionnement des éoliennes, d'énumérer les types existants des éoliennes et de présenter les différents composants des éoliennes à axe horizontal et à vitesse variable.

La 2^{ème} partie porte sur l'état de l'art sur le diagnostic de défauts des systèmes : nous avons défini les termes rencontrés dans le domaine de diagnostic de défauts, ensuite les défauts des systèmes sont classifiés selon leur localisation, selon leur évolution temporelle et en fonction de leur impact sur les performances des systèmes à surveiller. En outre, une classification des méthodes de diagnostic de défauts est établie.

1^{ère} Partie : État de l'art sur la conversion d'énergie éolienne

I.1.1 Situation du marché de l'énergie éolienne

I.1.1.1 Dans le monde

Le marché mondial de l'éolien enregistre un accroissement continu depuis l'année 2000 comme le montre le graphe présenté sur la figure (I.1). Cette expansion rapide du marché éolien mondial est expliquée par le fait que les problèmes environnementaux ont devenu une préoccupation majeure des populations et les pouvoirs publics ; de plus les pays du monde entier ont exprimé une forte volonté pour faire face à ces problèmes et à leurs répercussions sur l'économie et dans cette perspective, ils ont tracé des stratégies nationales ambitieuses et ils ont créé un environnement législatif et réglementaire favorable pour maîtriser de mieux en mieux la technologie éolienne.

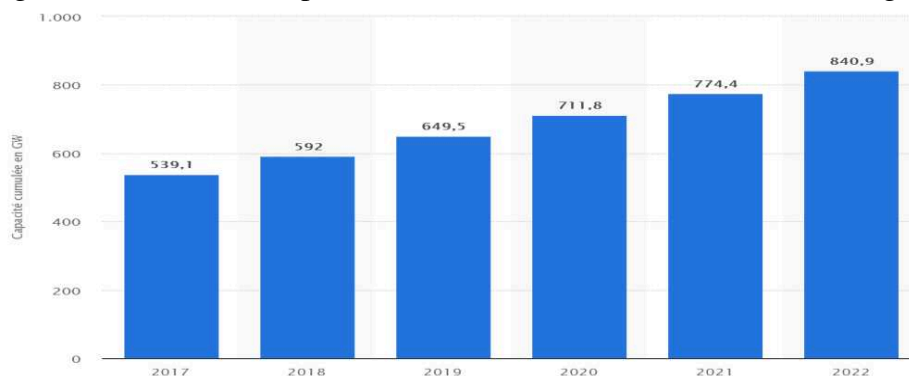


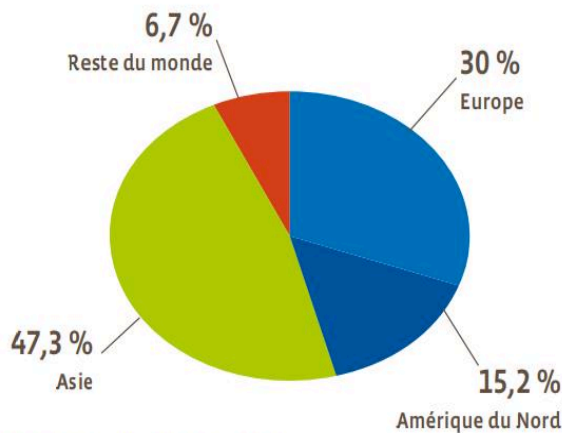
Figure I.1 Capacité éolienne cumulée installée dans le monde de 2017 à 2022 [© Statista 2019]

Selon le graphe, nous constatons que la puissance du parc mondial atteint 539 256 MW à la fin de l'année 2017, augmentée de 10,5 % par rapport à l'année 2016. Par maintenir le même rythme de croissance, les experts du GEWC (Conseil Mondial de l'Énergie Éolienne) prévoient que la puissance éolienne installée dépasse les 790 000 MW d'ici fin 2020 et atteindra les 840 GW en 2022.

Une analyse géographique a abouti à la répartition suivante du marché éolien mondial :

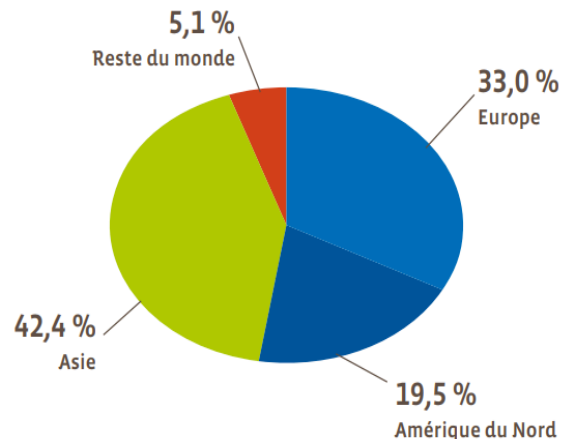
Près de la moitié (47,3 %) de la puissance mondiale installée durant l'année 2017, (42,3 %) de la puissance cumulée dans le monde, est produite en Asie. L'Europe représente plus que le tiers (33 %) du parc mondial et demeure la seconde zone d'implantation (30,8 %) des installations éoliennes. Tandis que, la zone nord-américaine (incluant le Canada et le Mexique) constitue 19,5 % du parc mondial et dispose de plus de 15 % des installations annuelles.

Les deux graphes montrent la répartition du marché éolien mondial durant et à la fin de l'année 2017 :



* Estimation. Source : EurObserv'ER 2018.

Figure I.2 Répartition mondiale du marché éolien en 2017 [EurObserv'ER 2018]



* Estimation. Source : EurObserv'ER 2018.

Figure I.3 Répartition de la puissance éolienne mondiale fin 2017 [EurObserv'ER 2018]

I.1.1.2 Dans l'Union Européenne

Le marché de l'éolien de l'Union européenne a enregistré une hausse d'installation en 2017 traduite par une puissance nouvellement installée de 14 750 MW (14,1 GW) avec une puissance de 605 MW mise hors service, par rapport à une puissance installée de 13,1 GW en 2016. Ainsi, le parc éolien de l'Union européenne atteint 169 GW comme le montre le tableau 1.

Cette hausse s'explique par le développement des trois principaux grands marchés de l'UE, et qui sont, en premier rang l'Allemagne, qui a enregistré un nouveau record d'installation avec 6 440 MW en 2017. Le marché du Royaume-Uni a également regagné sa dynamique, avec au moins 2 780 MW supplémentaires. Le marché français s'est relancé et a établi près de 1 800 MW installés l'an dernier. D'autres marchés de l'Union européenne ont maintenu leur intensité, comme l'Irlande qui ajoute 538 MW, la Finlande qui ajoute 515 MW et la Belgique, 465 MW. Les marchés suédois (+ 226 MW), autrichien (+ 195 MW) et grec (+ 171 MW). Aucune puissance supplémentaire n'a été installée dans près de la moitié des pays de l'Union (13 sur 28) et dans quelques autres, les marchés sont restés relativement faibles (Pays Bas, Lituanie, Pologne). En Espagne, la puissance nette en fonctionnement ne progresse que marginalement depuis le moratoire sur les aides apportées aux énergies renouvelables en janvier 2012. Le marché italien a également

considérablement ralenti depuis 2013. En 2017, il n'ajoute que 359 MW, ce qui est mieux que les 247 MW ajoutés en 2016.

Tableau I.1 Puissance éolienne installée dans l'Union européenne fin 2017 (en MW) [EurObserv'ER 2018]

	Puissance cumulée fin 2016	Puissance cumulée fin 2017	Puissance installée en 2017	Mises hors-service en 2017
Allemagne	49 592	55 602	6 440	430
Espagne	23 075	23 170	95	0
Royaume-Uni	16 217	19 000	2 783	0
France**	11 761	13 559	1 798	0
Italie	9 384	9 743	359	0
Suède	6 495	6 721	226	0
Pologne	5 747	6 397	650	0
Danemark	5 246	5 521	373	98
Portugal	5 313	5 313	0	0
Pays-Bas	4 257	4 270	81	68
Irlande	2 827	3 365	538	0
Roumanie	3 025	3 029	4	0
Belgique	2 383	2 848	465	0
Autriche	2 649	2 844	195	0
Grèce	2 370	2 541	171	0
Finlande	1 532	2 044	515	3
Bulgarie	699	699	0	0
Croatie	483	527	44	0
Lituanie	509	521	12	0
Hongrie	329	329	0	0
Estonie	310	310	0	0
République tchèque	282	282	0	0
Chypre	168	168	0	0
Luxembourg	117	116	0	1
Lettonie	70	66	0	4
Slovénie	5	5	0	0
Slovaquie	3	3	0	0
Malte	0	0	0	0
Total UE 28	154 847	168 993	14 750	605

* Estimation. ** Départements d'outre-mer non inclus pour la France. Source : EurObserv'ER 2018.

I.1.1.3 Au Maroc

Selon les dernières études statistiques publiées par le *Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC)*, la puissance installée d'origine éolienne a atteint 962 MW en 2018 dans les pays d'Afrique et du Moyen-Orient (MEA), ce qui correspond à une hausse de plus de 300 MW en comparaison avec l'année 2017. Les trois principaux marchés d'Afrique et du Moyen-Orient en 2018 sont : L'Egypte (380MW), Le Kenya (310MW) et le **Maroc (120MW)**. Selon les perspectives, la région MEA ajoutera chaque année plus de 1 GW de nouvelles capacités éoliennes, donc une capacité supplémentaire de 6,5 GW sera ajoutée d'ici 2023.

L'évolution de la puissance éolienne installée au Maroc est montrée sur la figure suivante :

Tableau I.2 Puissance éolienne globale installée en (MW) fin 2017 (AFRIQUE & MOYEN ORIENT)

La capacité Globale Installée en MW à fin 2017 (AFRIQUE & MOYEN ORIENT)	
Pays	Capacité globale
Afrique du sud	2085
Egypte	810
Maroc	787
Ethiopie	324
Tunisie	245

Le plus grand parc éolien installé en 2014 au Maroc est celui de Tarfaya au sud du Maroc (300 MW). Ce parc est classé le plus grand en Afrique, précédant le parc éolien d'Ashegodae en Éthiopie (120 MW). La part de la puissance électrique solaire et éolienne devra s'établir à 40% en 2030 contre 13% en 2016 et seulement 2% en 2009. À terme, 1.330 MW pour l'hydraulique seront installés contre 4.560 MW pour le solaire et 4.200 MW pour l'éolien.

I.1.2 Notions de base sur l'énergie éolienne

- **La ressource 'vent' :**

Le vent circulant autour du globe est sous forme de courants thermiques, entraînés par la différence de températures entre l'équateur et les pôles, suite au rayonnement solaire reçu par la terre. Donc le soleil est l'origine/l'initiateur de l'énergie éolienne. Le vent peut changer en permanence sa vitesse et sa direction, ce qui donne naissance à des fluctuations rapides, causées par les turbulences et qui sont les rafales et accalmies. Nous parlons d'une rafale, lorsqu'il y a une soudaine élévation de la vitesse du vent alors qu'une accalmie provient quand la vitesse du vent est brusquement réduite.

La circulation des vents sur la planète est liée aux conditions géographiques locales. En effet, le flux de vent entre la mer et la terre est entraînée par la différence entre le réchauffement de la surface terrestre et celui de la surface de la mer adjacente : pendant la journée, la température sur la terre est plus élevée que celle sur la surface de la mer mais pendant la nuit c'est l'inverse qui se produit. Aussi, le vent qui s'écoule entre la montagne et la vallée est couplé au réchauffement journalier et à la lumière, Lors des journées chaudes et ensoleillées, les sommets des montagnes se réchauffent plus que sur la vallée alors le vent se déplace de la vallée vers la montagne. Pendant la nuit, le phénomène inverse se produit : l'air s'écoule des sommets vers le fond de la vallée.

- **Turbulence:**

Toute évolution chaotique ou irrégulière du flux, produite à l'intérieur d'un fluide. Les turbulences du vent sont définies comme étant des changements soudains dans la vitesse et la direction de celui-ci. Généralement, les turbulences apparaissent dans les zones proches de obstacles à savoir les arbres, les immeubles, les falaises et à proximité des éoliennes.

Les turbulences naissant à proximité des éoliennes ont un impact négatif sur la durée de vie des composants mécaniques de ces installations tels que les multiplicateurs, les pales et les paliers. Ces phénomènes peuvent aussi réduire le rendement énergétique produit par les éoliennes car ils ne permettent pas aux pales d'être dirigées face au vent. De plus, les turbulences accélèrent l'usure des pales des éoliennes suite à l'augmentation de la charge dynamique que subissent celles-ci.

La turbulence de la vitesse du vent est calculée en divisant la déviation standard de la vitesse du vent par rapport à la vitesse moyenne du vent sur 10 minutes par la vitesse moyenne du vent, selon la formule suivante :

$$T_v = \frac{\sigma_v}{m_v} \quad \text{I.1}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot (v_i - \bar{v}_{10min})^2} \quad \text{I.2}$$

D'où : T_v est la turbulence de la vitesse du vent ; σ_v est la déviation standard de la vitesse du vent ;

m_v est la moyenne de la vitesse du vent ; n est le nombre d'échantillons ; v_i : vitesse du vent d'un échantillon et \bar{v}_{10min} la vitesse moyenne du vent sur 10 minutes sur un échantillon donné.

- **Rugosité et Cisaillement du vent :**

La rugosité désigne l'état de surface qui influe sur la vitesse du vent. De façon générale, une grande rugosité ralentit bien évidemment la vitesse du vent, elle se présente dans les forêts, dans les paysages avec de l'herbe longue et dans les grandes villes.

Pour évaluer le potentiel éolien dans un site donné, deux notions sont considérées : la classe de rugosité et la longueur de la rugosité. En ce qui concerne la classe de rugosité, la surface de la mer est classée '0', les pistes d'atterrissage en béton et les paysages avec de l'herbe broutée par les moutons, ont une classe de rugosité égale à '0.5' et les terres agricoles cultivées, avec de rares maisons et clôtures, distantes les unes des autres de quelque 500 m appartiennent à la classe de rugosité '2'. La longueur de rugosité désigne la hauteur au-dessus du sol à laquelle la vitesse moyenne du vent en théorie serait égale à zéro.

Le cisaillement du vent est dû au frottement de celui-ci contre la surface terrestre ce qui entraîne la variation de la vitesse du vent. Donc, lorsqu'on se positionne à une haute altitude, l'influence de

la surface terrestre sur le vent est limitée. Sur une surface lisse, telle qu'une piste d'atterrissage en béton, le vent souffle plus fort que sur des villages, des forêts ou des terrains avec une surface très rugueuse ou irrégulière. Les facteurs accentuent le phénomène de cisaillement du vent sont : la rugosité de la surface, la présence des obstacles et des contours du terrain.

- **Énergie cinétique du vent :**

Est la quantité d'énergie contenue dans la ressource vent et susceptible d'être convertie en électricité par une éolienne, calculée en (kWh). Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : La densité de l'air, c.-à-d. la masse de l'air par unité de volume, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. Donc, la puissance du vent est donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{I.3}$$

Avec :

ρ est la densité de l'air sec, égale à $1,225 \text{ en } \text{kg}/\text{m}^3$ à une température de 15°C et à pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, S est la surface balayée par le rotor de l'éolienne, dans le cas d'une surface circulaire $S = \pi \cdot R^2$, R est le rayon du rotor mesuré en mètres (m), v est la vitesse du vent exprimée en (m/s).

D'après la formule, l'énergie du vent récupérable par l'éolienne varie avec le cube de la vitesse moyenne du vent et aussi avec l'accroissement de la surface balayée par le rotor et par conséquent par la longueur des pales du rotor. De plus, la densité atmosphérique dépend de la température, de l'humidité et de l'altitude.

- **Densité de Puissance Éolienne :**

Elle est exprimée uniquement en fonction de la vitesse du vent et de la densité atmosphérique et elle permet l'évaluation du potentiel éolien disponible sur un site donné. Elle est calculée en watt par mètre carré par l'équation suivante :

$$DPE = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad \text{I.4}$$

- **Limite de Betz :**

C'est la limite théorique, détermine la quantité d'énergie cinétique du vent maximale qu'une éolienne est capable de convertir en énergie mécanique de rotation. Selon la loi de Betz, formulée par le physicien Allemand Albert Betz pour la première fois en 1919, une éolienne ne peut convertir plus de $16/27$ (59.3%) de l'énergie cinétique du vent en énergie de rotation.

Le coefficient de puissance C_p est un facteur sans dimension, qui indique le pourcentage de la puissance du vent récupérée et convertie en puissance mécanique par l'éolienne. Sa valeur maximale théorique est donnée par : $C_{pmax} = 0.59$, cette limite n'est jamais atteinte lors du

fonctionnement de l'éolienne, à cause des pertes au niveau du multiplicateur, des roulements, de la machine et des convertisseurs de l'électronique de puissance. Dans les meilleures conditions, le C_p est compris entre 0.35 et 0.45 et chaque éolienne possède un coefficient de puissance propre à elle, déterminé par le constructeur.

La courbe de puissance montre la quantité d'énergie électrique produite par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

- **Vitesse de démarrage & Vitesse de coupure :**

C'est la vitesse de vent à laquelle l'éolienne est censée démarrer, elle est normalement de 3 à 5 m/s. L'éolienne s'arrête automatiquement lorsque la vitesse du vent atteint une valeur plus de 25 m/s en vue de ne pas endommager l'éolienne et son environnement extérieur. Cette vitesse d'arrêt de l'éolienne est appelée la vitesse de coupure.

1.1.3 Principe de conversion de l'énergie éolienne

Une éolienne ou connue aussi appelé « Aérogénérateur », est une machine/un dispositif permettant de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en en énergie mécanique de type éolienne, utilisée jadis pour moudre les grains du blé et pour pomper l'eau d'irrigation. Son principe de fonctionnement est simple et peut se résumer ainsi : Sous l'effet du vent, l'hélice, appelée aussi rotor, se met en marche et ses pales tournent. Cette énergie mécanique produite est convertie par le moyen d'un arbre principal lent, d'un multiplicateur (dans la majorité des cas) et d'une génératrice en énergie électrique, transportée et injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau) ou consommée localement ou stockée dans des batteries dans le cas des éoliennes à utilisation autonome, employées dans les sites isolés.

Les principales composantes d'un système ordinaire de conversion de l'énergie éolienne, connecté au réseau électrique sont montrées sur la figure suivante :

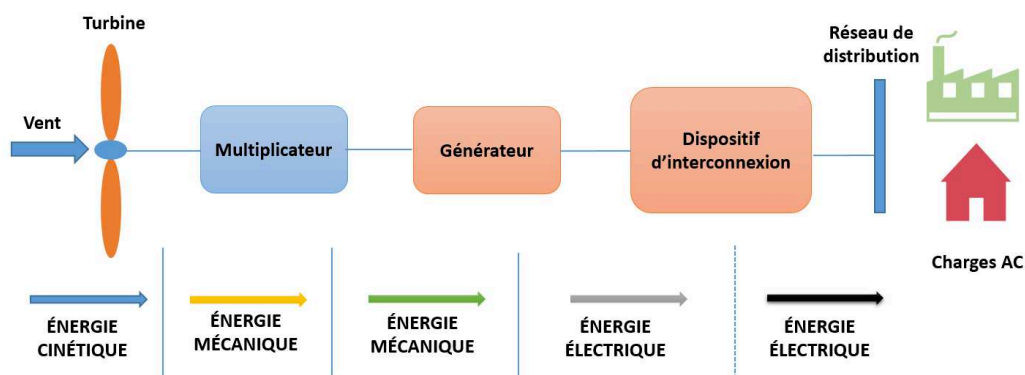


Figure 1.4 Structure du système de conversion d'énergie éolienne, connecté au réseau électrique

Il est à noter qu'une éolienne démarre son activité avec un vent soufflant à une vitesse de 10 à 15 km/h, et atteint son régime optimal lorsque qu'il est à 50 km/h. Par mesure de sécurité, elle s'arrête automatiquement lorsque les vents atteignent 90 km/h.

I.1.4 Classification des éoliennes

La classification des éoliennes, peut se faire selon différents critères, à savoir : la localisation géographique, la disposition géométrique de l'axe de rotation, la taille de l'éolienne, le régime de fonctionnement, le secteur d'utilisation et le mode de régulation de la vitesse du rotor.

I.1.4.1 Selon la localisation

Nous trouvons sous cette classe :

a. Les éoliennes terrestres « Onshore » & en pleine mer « Offshore »

Considérant le critère de localisation géographique, nous pouvons distinguer entre deux types d'éoliennes : les éolienne terrestres 'Onshore' et les éoliennes en mer 'Offshore'. Ces deux types ont le même aspect et le même principe de fonctionnement, mais se différencient par la nature des fondations. L'éolienne 'onshore' est installée sur la terre ferme alors que l'éolienne 'offshore', elle est soit enfoncée et ancrée au fond de la mer sur une fondation dite 'posée', soit montée sur une fondation simplement reliée au fonds marins par des lignes d'ancrage, cette fondation est dite 'flottante.' La technologie de l'éolien offshore peut produire jusqu'à 2 fois plus d'électricité qu'une éolienne terrestre, car le vent souffle beaucoup plus fort au large des côtes et la productivité est donc accrue. Mais, du fait des conditions marines difficiles, les mâts des aérogénérateurs en mer, doivent résister à la force des vagues et du courant. C'est pourquoi, il faut songer surtout à leur protection contre la corrosion et au raccordement électrique via des câbles sous-marins. Ces facteurs, entraînent des coûts de construction, d'installation et de maintenance beaucoup plus élevés en mer que sur terre [Gouadec. D 2015].

b. Les éoliennes volantes « Farshore »

L'éolienne volante a la particularité de produire de l'électricité plus loin des côtes, où l'eau est beaucoup plus profonde et les vents marins sont plus forts et plus stables. Cette structure est caractérisée par sa facilité d'installation puisqu'elle ne nécessite pas de bâtir des fondations ou d'utiliser des navires comme pour l'éolien posé. Par ailleurs, les problèmes visuels et maritimes se posent vu l'éloignement important des côtes (entre 15 et 22 km). Aujourd'hui, la nouvelle technologie de d'éolien « *farshore* », c'est-à-dire en haute-mer n'a pas encore atteint sa phase de maturité, elle est à ses débuts avec l'installation de premiers pilotes et le secteur s'annonce stratégique pour les régions littorales sur le plan industriel, écologique et social. Le potentiel de l'éolien flottant exploitable est estimé à 600 GW en Europe contre 250 GW pour la technologie de l'éolien posé [Iifpenergiesnouvelles 2019]

Un autre type d'éolienne a vu le jour, ce sont les éoliennes volantes ou aussi appelées les éoliennes aériennes. Ces dernières attirent de plus en plus l'attention des constructeurs, car les vents les plus forts soufflent à 300 m d'altitude, A cette hauteur le vent souffle à une vitesse comprise entre 100 et 350 km/h et de manière constante. Dans cette catégorie, deux familles principales de prototypes ont été développées par les États-Unis et par plusieurs autres pays. Le premier type d'éolienne volante comporte plusieurs rotors et ressemble dans son aspect à celui d'un hélicoptère, rattaché par un câble à la terre. Par des mouvements circulaires à environ 300 mètres de hauteur, l'électricité est produite et ensuite transférée à la terre par le biais du câble d'attache. Ce modèle a été conçu par l'entreprise américaine **Makani Power**. Elle annonce que ce modèle est deux fois plus productif en énergie grâce aux vents puissants à cette altitude.

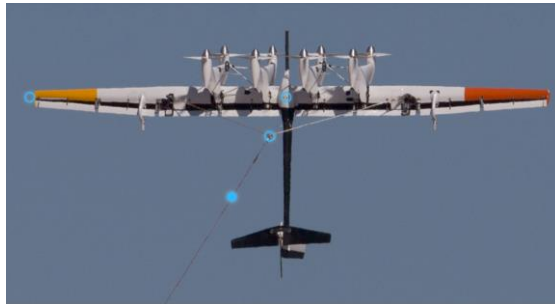


Figure I.5 Éolienne volante conçue par Makani Power [Makanipower 2019]

Le deuxième prototype a la forme d'un gros ballon gonflé à l'hélium avec des pales tournant à une altitude de 600 mètres, où les vents sont encore plus forts. Ce prototype est produit par la firme américaine **Altaeros Energies**. En plus de la production de l'électricité, cette éolienne peut être employée dans une variété de services. En effet, elle pourrait être utilisée pour la surveillance et la communication par exemple. Cette éolienne est destinée surtout aux particuliers, car elle ne produit qu'une faible puissance (quelques kW). Les points forts des éoliennes volantes sont nombreux et se résument ainsi : elles offrent un gain de place, plus d'esthétique, moins de bruits et de nuisances sonores, efficacité de production et réduction des coûts, absence du risque de collision avec les avions vu que ces éoliennes volent bien en dessous des couloirs aériens classiques, aussi bien pour les oiseaux car elles volent à des endroits plus hauts où le passage des volatiles est très rare.

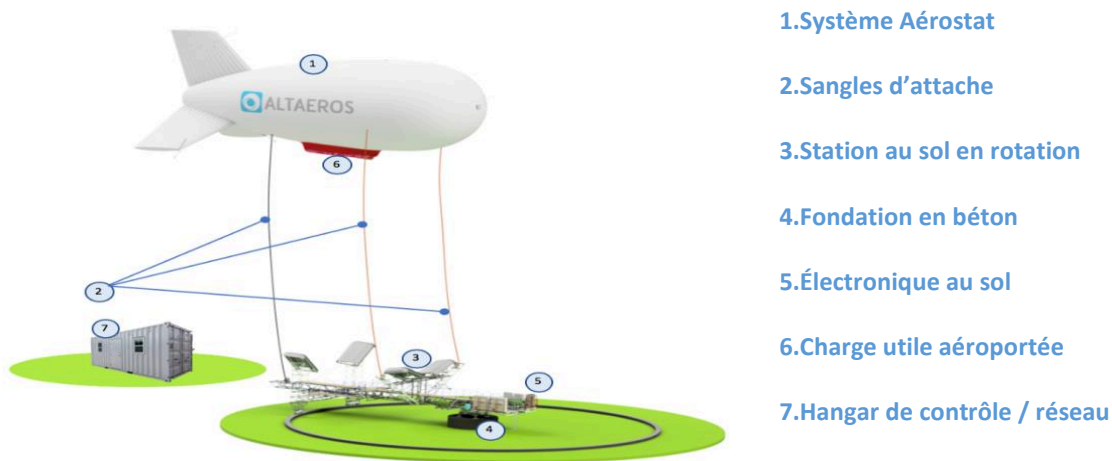


Figure I.6 Prototypé d'éolienne aérienne développé par ALTAEROS [altaeros 2019]

I.1.4.2 Selon la disposition géométrique de l'axe du rotor

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal.

a. Éolienne à axe vertical

En anglais VAWT : *Vertical Axis Wind Turbine*, ces aérogénérateurs sont les premiers à être utilisés pour la production de l'énergie électrique. Selon leur caractéristique aérodynamique, ces éoliennes peuvent être classées en trois grandes familles :

Les éoliennes du type *Darrieus*, basées sur la "portance", sont conçues par l'ingénieur français *George Darrieus* en 1931. Elles ressemblent dans leur structure à un fouet à œufs vu la forme en 'C' de leurs pales. C'est la seule éolienne à axe vertical qui a été commercialisée par la compagnie *FloWind* qui la fabriqua jusqu'à son faillite en 1997. Le fonctionnement de ce type d'aérogénérateurs repose sur la génération d'un couple moteur entraînant la rotation du dispositif, suite à des forces de direction et d'intensité variables, exercées sur le profil placé dans la direction d'écoulement d'air. La mise en rotation de l'éolienne ne peut se faire d'elle-même, elle a besoin d'être amorcée par un dispositif extérieur. Dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, ceci ne pose pas problème, car la machine peut être utilisée comme un moteur qui absorbe du courant du réseau pour démarrer l'éolienne [Djeriri 2015]. La figure suivante présente la structure des éoliennes de Darrieus :

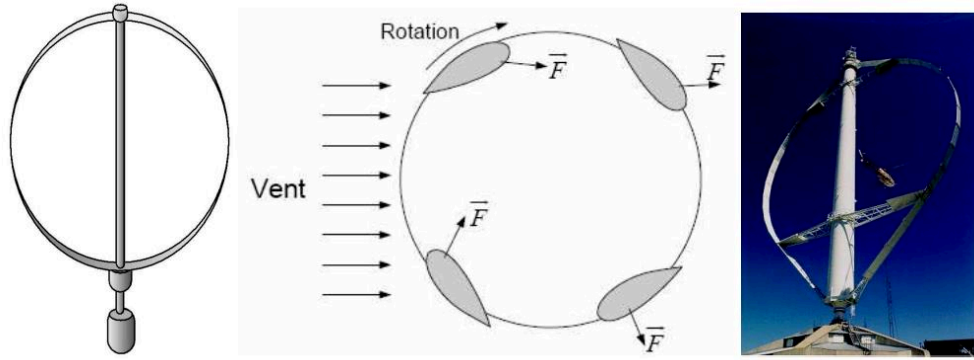


Figure I.7 Éoliennes de *Darrieus* [Boyette 2006]

Les aérogénérateurs à rotor de *Savonius* :

Inventés par le finlandais *Siguard Savonius* en 1924, le fonctionnement de ces dispositifs repose sur le principe de la traînée différentielle. Dans ce cas le couple moteur entraînant la génératrice est obtenu par les efforts d'intensité différente, exercés par le vent sur chacune des faces concaves et convexes de la structure.

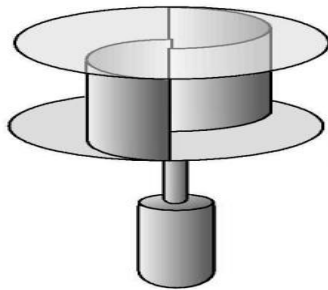


Figure I.8 Aérogénérateur de *Savonius* [Djeriri 2015], [Boyette 2006]

Un troisième type des aérogénérateurs à axe vertical, est connu sous l'appellation de rotor en "H" ou le rotor de *Musgrove*. Cette appellation est expliquée par la forme en 'H' des lames ou des pales de l'éolienne. Ce type d'aérogénérateur est capable de démarrer seul et commence à produire de l'énergie lorsque le vent souffle à une faible vitesse de l'ordre de 1 [m/s]. Il ne nécessite pas de régulation mécanique et résiste à des vents violents.

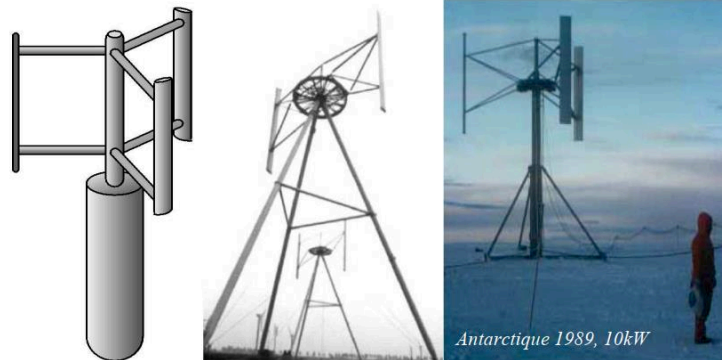


Figure I.9 Aérogénérateur à rotor vertical de type H [Djeriri 2015]

La structure d'éolienne à rotor vertical offre les avantages suivants : [Ghennam 2011]

- L'accessibilité à la génératrice et au multiplicateur vu qu'ils sont mis directement au sol, ce qui rend la tâche de maintenance et d'entretien facile
- Le dispositif est symétrique et le vent provient de toutes les directions sans la nécessité d'orienter le rotor face au vent.

Cependant, les principaux inconvénients d'une telle structure sont les suivants [Aimani 2004]

Faible vitesse du vent à proximité du sol,

- Démarrage non automatique de l'éolienne,
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées,
- Faible rendement et des fluctuations importantes de puissance.

b. Éoliennes à axe horizontal

Elles sont nommées en anglais (*HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine*) ; l'idée de leur conception est inspirée de la technologie ancestrale des moulins à vent. Le rotor de l'aérogénérateur est constitué des pales ressemblant dans leur profil aux ailes d'avion, sauf que le principe de portance utilisé dans ce cas permet de générer un couple moteur entraînant la rotation de la génératrice qui produit de l'électricité et non pas pour maintenir l'avion en vol [Poitiers 2003]. En fonction du nombre des pales, une éolienne du type HAWT peut être mono-pale, bipale, tripale ou multi-pale. Dans le cas d'une éolienne monopole, le coût de sa construction est réduit bien évidemment car la quantité des matériaux utilisés est moindre et cela entraîne des pertes aérodynamiques par poussée réduites, mais cette éolienne est moins utilisée à cause de la nécessité d'utilisation d'un contrepoids, la même raison s'annonce dans le cas des éoliennes bipales [LOPEZ Miguel 2010]. C'est pourquoi, la majorité des éoliennes installées ou à vocation d'être implantées sont toutes du type tripale. Cette structure garantit plus de stabilité du fait que la charge aérodynamique est relativement uniforme et aussi car leur coefficient de puissance C_p est de très proche de la limite de Betz [MANWELL J. 2010]

Les aérogénérateurs HAWT peuvent être classifiées selon l'orientation des pales face au vent en deux types : l'éolienne HAWT en « amont » (up-wind), dont la structure est présentée sur la figure I.7 ou en « aval » (down-wind), montrée sur la figure I.8. Le premier type est caractérisé par un rotor positionné face au vent ; le flux d'air frappe directement sur les pales et le problème de « l'ombre de la tour » (tower shadow) n'est pas posé. Par ailleurs, un dispositif d'orientation automatique et en permanence de la turbine éolienne est primordial, ce mécanisme peut être passif par le moyen d'une aile fixe verticale ou actif par le biais d'un moteur électrique. Pour le deuxième type, le vent souffle derrière le rotor, donc le vent atteint les pales après avoir balayer la nacelle. Ceci entraîne une usure prématurée du matériel par les phénomènes vibratoires ou de fatigue mécanique [Attoui 2015].

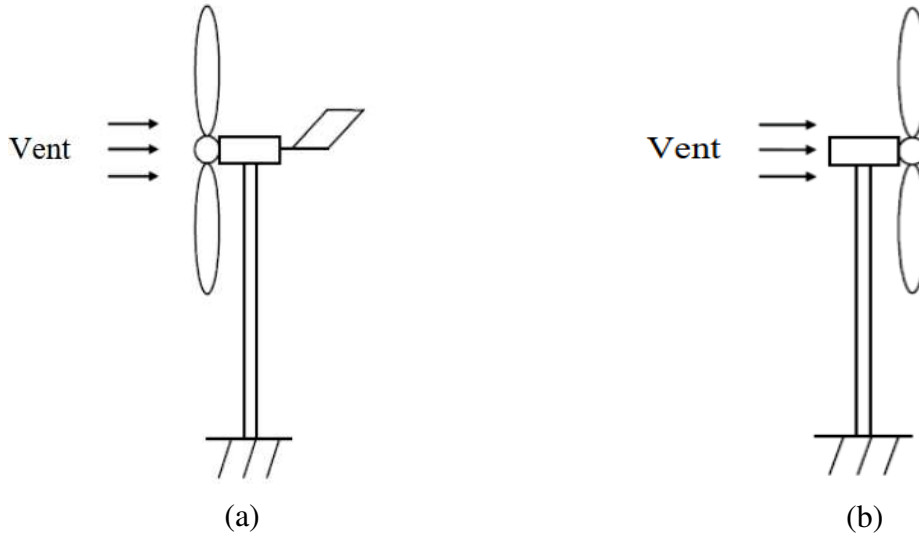


Figure I.10 Les éoliennes HAWT (a)- en amont ; (b)- en aval [Djeriri 2015]

En conclusion, la majorité des éoliennes actuellement installées sont à axe horizontal avec le rotor en amont.

I.1.4.3 Selon la taille de l'éolienne

En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, la puissance générée dépend étroitement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre de l'hélice.

Le tableau suivant montre les dénominations de taille des éoliennes et les ordres de grandeur des puissances associées. Il faut bien noter qu'il s'agit d'ordres de grandeur de puissance, car c'est la vitesse du vent qui définit la valeur de puissance délivrée par l'éolienne.

Tableau I.3 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé [Energie 2016]

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

I.1.4.4 Suivant le régime de fonctionnement

Selon le critère du régime de fonctionnement, les éoliennes peuvent être classées en deux grandes familles : les systèmes éoliens connectés au réseau « On-grid » et les systèmes éoliens isolés ou autonomes « Off-grid ».

Le premier type qui est l'application « connecté réseau » ou aussi appelée « grand éolien » est prédominant dans le marché éolien, en terme de puissance installée. Dans ce cas, la turbine éolienne est équipée d'un transformateur qui élève la tension délivrée par la génératrice, généralement de 400 ou 690 V, à une haute tension HTA de 20 kV. L'électricité produite est acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis acheminée vers les consommateurs les plus proches.

La deuxième classe d'éoliennes permet d'alimenter en courant un site isolé non raccordé au réseau électrique, et dans ce cas, des batteries sont utilisées en vue de stocker le surplus d'électricité générée lorsque la puissance éolienne dépasse la demande et cette énergie stockée peut être ainsi sollicitée lorsque le vent ne souffle pas suffisamment pour répondre directement à la demande des consommateurs.

I.1.4.5 Selon le secteur d'utilisation

Dans cette catégorie, On distingue deux typologies d'installations :

- Industrielles : lorsqu'on parle des grands parcs éoliens ou aussi « fermes éoliennes », raccordés au réseau électrique,
- Domestiques pour les petites éoliennes installées chez les particuliers pour le pompage ou l'électrification.

I.1.4.6 Selon le mode de régulation de la vitesse de la turbine

Selon la vitesse de rotation du générateur, on classe les éoliennes en deux types : il s'agit des éoliennes à vitesse fixe et éoliennes à vitesse variable.

a. Les éoliennes à vitesse fixe :

Appelées en anglais (*FSWT : Fixed Speed Wind Turbine*), elles constituent les premières éoliennes qui ont été conçues. Elles se caractérisent par le fait que le rotor de l'éolienne tourne toujours à la même vitesse angulaire quel que soit la vitesse du vent, la vitesse angulaire dépend essentiellement du profil des pales et de la fréquence du réseau dans le cas d'une éolienne à vitesse fixe raccordée au réseau électrique.

La quasi-totalité des éoliennes utilisent des générateurs asynchrones à cage (GAS) [Vladislav Akhmatov 2007]. Cependant, la génératrice synchrone est occasionnellement utilisée vu les inconvénients majeurs qu'elle présente dans un tel système. Pour l'éolienne à vitesse fixe basée sur

une machine asynchrone à cage, la vitesse de rotation (Ω_{mec}) est étroitement liée à la fréquence des courants des enroulements statoriques. La machine asynchrone à cage ayant un nombre fixe de paires de pôles, fonctionne donc sur une plage de vitesse très restreinte où le glissement est de l'ordre de quelques %. Quant à la machine synchrone, elle ne peut opérer qu'en vitesse fixe. Ces éoliennes peuvent fonctionner en deux modes distincts : en mode autonome et en mode réseau.

- **En mode de fonctionnement autonome** : dans ce cas, le rotor de la génératrice est couplé mécaniquement à l'arbre de transmission de la turbine éolienne via un multiplicateur de vitesse, qui entraîne la génératrice à une vitesse maintenue constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Dans cette configuration, l'introduction d'un système de stockage est importante surtout en cas de la non disponibilité des groupes électrogènes d'appui et aussi en cas d'une vitesse de vent faible ; de plus, une batterie de condensateurs est souvent utilisée pour fournir la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. La figure ci-dessous montre la structure de l'éolienne à vitesse fixe utilisée en mode isolé :

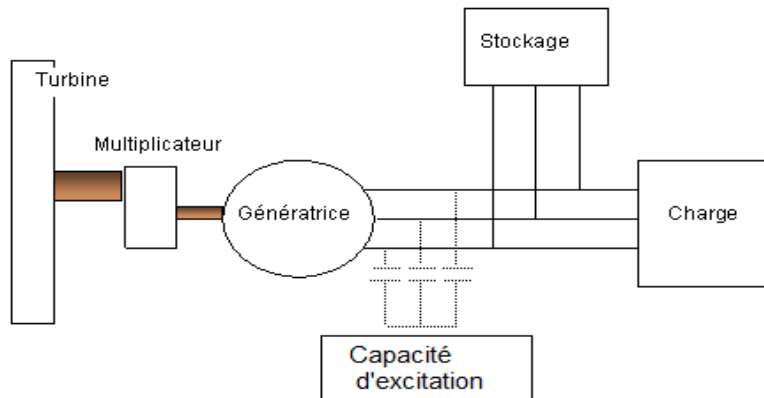


Figure I.11 Configuration d'une éolienne à vitesse fixe, en mode autonome

- **En mode de raccordement au réseau** : Lorsque l'éolienne est directement raccordée au réseau, la vitesse de rotation (Ω_{mec}) est étroitement liée à la fréquence des courants des enroulements statoriques, imposée par le réseau, et au nombre de paires de pôles de la génératrice. Cette dernière fonctionne en hypersynchrone et délivre de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice asynchrone à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme $\Omega_s = 1500 \text{ tr/min}$, ce qui nécessite l'introduction d'un multiplicateur en aval de la génératrice en vue d'adapter sa vitesse de rotation à celle du rotor de l'éolienne.

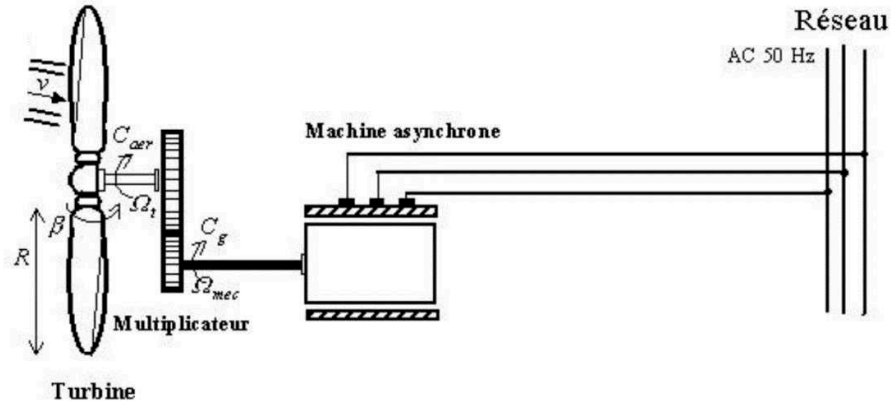


Figure I.12 Éolienne à vitesse fixe raccordée au réseau [Aimani 2004]

Les aérogénérateurs à vitesse fixe sont employés principalement dans le cas des faibles puissances (inférieures à 1MW). Ils sont connus par leur robustesse et la facilité de leur maintenance. Cependant, la puissance extraite n'est pas optimisée car la vitesse du rotor de la génératrice est fixe. Par ailleurs, le coût de maintenance est élevé à cause des coûts de réparation du multiplicateur de vitesse et la puissance réactive n'est pas contrôlée, elle est seulement compensée. Aussi, le raccordement direct de la génératrice au réseau via le stator, augmente l'influence de celui-ci sur tout le système lors de la présence des défauts [Teninge Alexandre 2010]. L'action permanente du système d'orientation des pales en vue de régler les variations de la vitesse du vent, entraîne des changements du couple mécanique. Ce qui provoque des variations imprévues du courant fournit au réseau électrique entraînant ainsi des perturbations.

Généralement, les éoliennes sont conçues de façon à produire le maximum de puissance pour une certaine valeur de vitesse du vent appelée vitesse nominale. Au-delà de cette vitesse, il est nécessaire de limiter la puissance mécanique à sa valeur nominale. Pour les éoliennes à vitesse fixe, la puissance mécanique peut être limitée selon deux méthodes : par décrochage aérodynamique (Stall), par un système d'orientation de pales :

- **Les éoliennes à décrochage aérodynamique (Stall)** : produisent une puissance variable qui croît avec la vitesse du vent jusqu'à ce que sa valeur maximale coïncide avec la puissance nominale de la génératrice. Au-delà de cette valeur nominale, la courbe de puissance chute plus vite avec la vitesse du vent [Muljadi 2002].

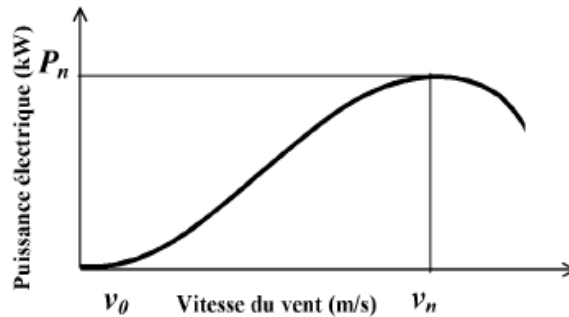


Figure I.13 Puissance électrique variable fournie (décrochage aérodynamique)

Avec P_n : puissance nominale de l'éolienne, V_n : la valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte, V_0 : la valeur de la vitesse pour laquelle la turbine commence à tourner.

Nous pouvons tracer cette courbe de puissance, en fixant les pales de la turbine de façon à diminuer brusquement la portance à partir d'une vitesse donnée à partir de laquelle la puissance commence à décroître, au-delà de cette vitesse de vent, la puissance décroît rapidement et un fonctionnement nominal n'est pas maintenu.

Pour les machines de grandes puissances, on trouve un système « Stall actif » [Mutschler and Hoffmann 2003], ce dernier permet d'obtenir progressivement le décrochage aérodynamique grâce à un dispositif de débattement des pales contre le vent. Ce système est avantageux en termes de cout et de simplicité du fait que l'orientation des pales est réduite.

- **Les éoliennes à pales orientables** : un système d'orientation des pales, permet une modification aérodynamique et de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure v_n [Müller 2002].

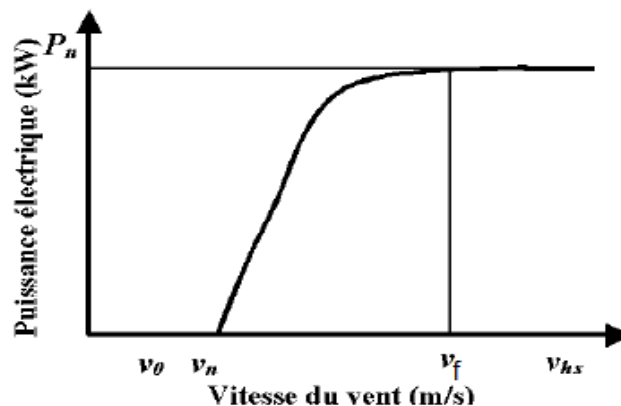


Figure I.14 Génération de puissance électrique nominale par orientation des pales

Avec :

v_f : La vitesse pour laquelle le générateur commence à produire de la puissance.

v_{hs} : La vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

La configuration des éoliennes à vitesse fixe entraîne les inconvénients suivants :

- L'usage d'un dispositif de production d'énergie réactive pour la magnétisation de la machine asynchrone, provoque des coûts supplémentaires et des pertes des flux d'énergie.
- La sollicitation permanente du système d'orientation des pales engendre du bruit,
- Variations brusques et rapides du courant injecté dans le réseau, dues aux variations du couple à cause du mouvement des pales pour maintenir une vitesse de rotation constante.

b. Éolienne à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable permettent d'améliorer l'efficacité de la conversion énergétique en adaptant la vitesse de la turbine à la vitesse du vent. Nous allons montrer ci-après l'intérêt de la vitesse variable :

- **Intérêt de la vitesse variable :**

Afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite de l'éolienne, il est préconisé de pouvoir varier la vitesse de rotation de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent, car si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. La figure présente La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent.

La caractéristique générale de la puissance disponible au niveau de la turbine éolienne en fonction de sa vitesse de rotation, est représentée sur la figure suivante :

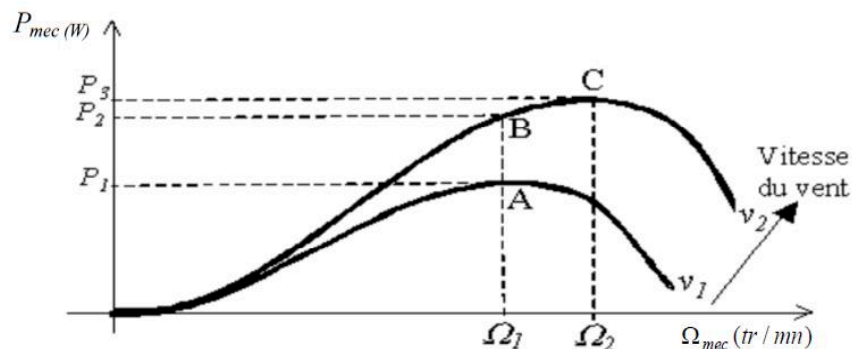


Figure I.15 La puissance mécanique générée par l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation [Ouyessaad 2014]

Si nous fixons la vitesse du vent v_1 et la vitesse de rotation de la génératrice à Ω_1 , la puissance nominale délivrée P_1 , désignée par le point A. Si la vitesse du vent varie et passe de v_1 à v_2 et que la vitesse de la génératrice reste fixe, la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique au point B, alors que la puissance maximale se trouve plus loin sur la même caractéristique au point C. Alors

si nous souhaitons extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . En conclusion, pour extraire le maximum de la puissance mécanique, il est primordial que la vitesse mécanique soit variable en fonction de la vitesse du vent [Aimani 2004].

Actuellement, ce type d'éoliennes est le plus privilégié par les constructeurs, car il permet d'optimiser la puissance délivrée en fonction du vent. Dans ce cas, le générateur à vitesse variable, permet d'opérer sur une large gamme de vents et donc de récupérer un maximum de puissance.

En faisant varier la fréquence d'alimentation de la machine, sa vitesse de rotation varie en conséquence, en passant du simple au triple généralement. Les systèmes à vitesse variable fonctionnant en mode réseau, utilisent un système de régulation de la vitesse de rotation, de façon à ce que l'éolienne débite une puissance maximale pour chaque vitesse du vent, cela est connu sous l'appellation « Maximum Power Point Tracking ».

Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes, nécessite des convertisseurs statiques et leurs dispositifs de commande. En effet, la fréquence et l'amplitude de la tension, en sortie de la génératrice, sont variables. Alors pour les adapter à la fréquence et l'amplitude de la tension, fixes du réseau, auquel la génératrice est raccordée, nous utilisons des convertisseurs de puissance agissant sur la fréquence variable, installés entre la machine (synchrone ou asynchrone) et le réseau. Le premier convertisseur (1) est un redresseur MLI qui convertit l'alternatif au continu et permet de fournir la puissance réactive magnétisante. Le deuxième convertisseur (2) est un onduleur MLI qui règle la valeur efficace de la tension ou du courant et la fréquence du courant ou de la tension, pour assurer la connexion au réseau. Ces deux convertisseurs statiques sont connectés par un bus continu, qui gère le transfert de puissance entre le redresseur et l'onduleur. Ce bus est constitué notamment d'un condensateur lissant et filtrant la forme d'onde en vue de réduire significativement les harmoniques de courant.

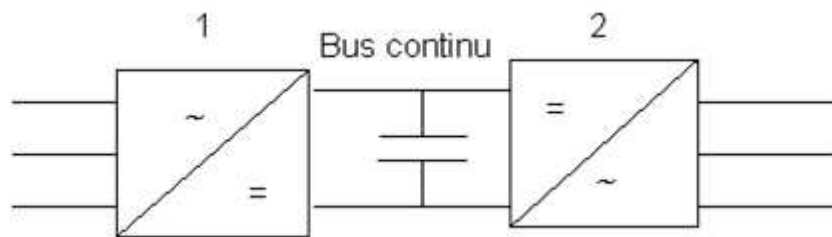


Figure I.16 Convertisseurs statiques de fréquence

Les deux configurations des éoliennes à vitesse variable, sont les suivantes :

- **Éoliennes à vitesse variable commandées par le stator**

Ce type d'éoliennes utilise les machines électriques, directement liées au réseau, à savoir: la machine asynchrone à cage caractérisée par sa robustesse et son faible coût, généralement liée à la turbine via un multiplicateur de vitesse (Figure I.17) et la machine synchrone à aimants

permanents qui peut être raccordée à la turbine par l'intermédiaire d'un multiplicateur (Figure I.18.a) ou couplée directement au réseau électrique (Figure I.18.b) dans le cas où la machine comporte un grand nombre de pôles évitant ainsi le multiplicateur de vitesse.

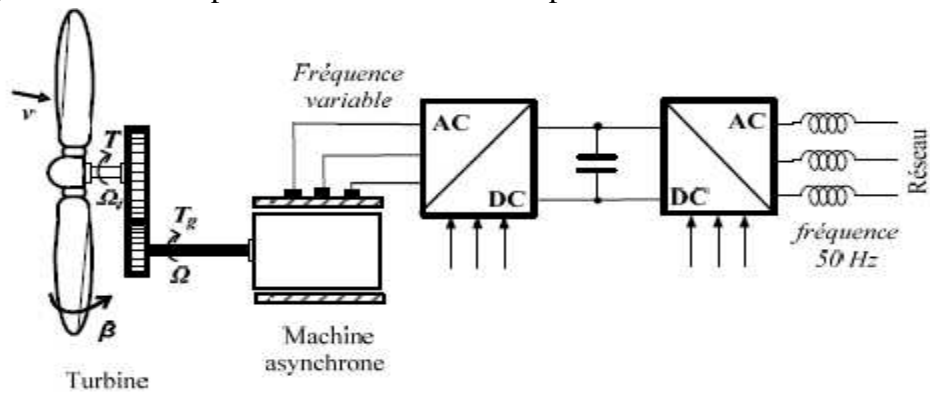
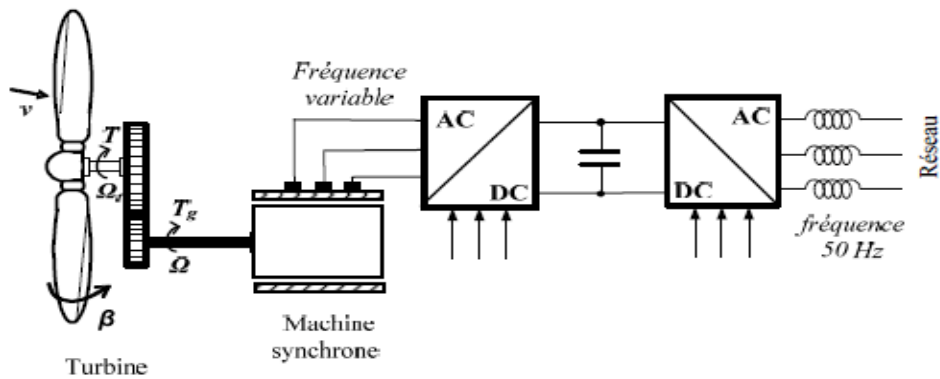
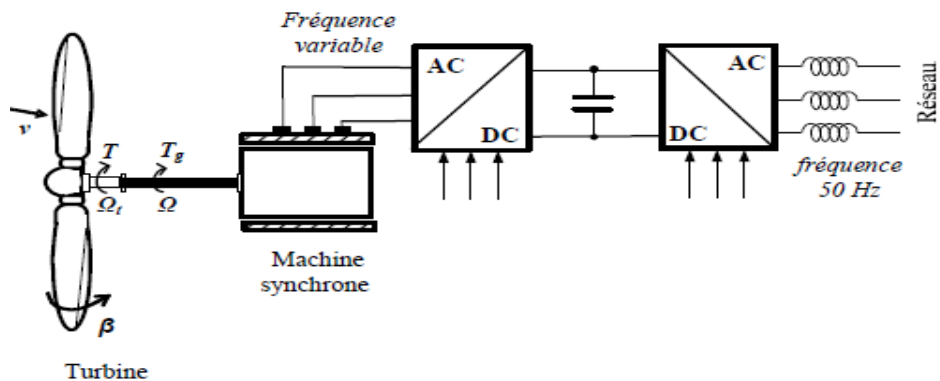


Figure I.17 Éolienne à vitesse variable basée sur une Machine Asynchrone(MAS)



a. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur.



b. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone directement couplée à la turbine.

Figure I.18 Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone

- **Éoliennes à vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation**

La machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone à rotor bobiné associée à un double convertisseur à modulation de largeur d’impulsion (structure de Scherbius) à IGBT. Elle a attiré beaucoup d’attention surtout dans le domaine de l’énergie éolienne, sa double alimentation s’explique par le fait que son stator est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau par l’intermédiaire de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau), selon la configuration montrée sur la figure suivante :

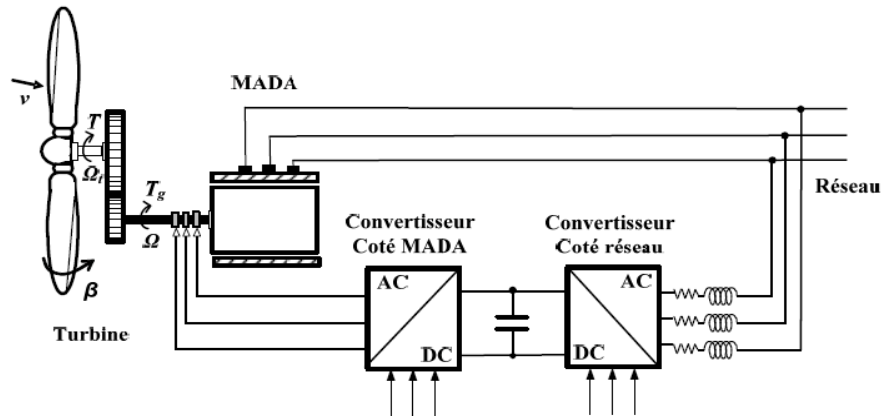


Figure I.19 Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA

Dans le secteur éolien actuel, la plupart des éoliennes installées ont un rotor à vitesse variable. Ceci est expliqué par les points forts que possèdent ces aérogénérateurs en comparaison avec les éoliennes à vitesse fixe. Ces avantages peuvent être listés comme suivant [Francois 2005]:

- Un système d’orientation des pales simple. En effet, le contrôle de la vitesse du générateur rend les constantes de temps mécaniques des pales plus longues, ce qui réduit la complexité du système d’orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale P_n ,
- L’adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent réduit les efforts mécaniques et ainsi l’influence des rafales du vent sur la puissance délivrée,
- Le bruit est affaibli lors des fonctionnements à puissance réduite car la vitesse du vent est lente,
- La plage de fonctionnement de l’éolienne est élargie et le maximum de la puissance est atteint pour les faibles vitesses de vent,
- Une meilleure intégration de l’éolienne au réseau électrique est assurée.

Malgré que le fonctionnement à vitesse variable présente plusieurs avantages, cette technologie d’éoliennes présente par ailleurs plusieurs inconvénients :

-Dans le cas de raccordement au réseau, le dimensionnement des convertisseurs et des filtres est effectué pour transiter la totalité de la puissance échangée entre le réseau et la machine, ce qui entraîne des problèmes de conception, d'encombrement et d'augmentation des coûts [Francois 2005],

- les pertes au niveau des convertisseurs électroniques de puissance s'élèvent avec l'augmentation de la puissance des éoliennes, ceci influence sur le rendement du système éolien et sur la plage entière de fonctionnement.

I.1.5 Constitution d'une éolienne à axe horizontal

Étant donné que la majorité des éoliennes installées dans le monde sont des éoliennes tripales à axe horizontal, nous traiterons ici leurs principaux composants :

I.1.5.1 Les pales du rotor

Les pales du rotor captent l'énergie cinétique du vent et la transforment en énergie mécanique traduite par la rotation du moyeu. Ce dernier fabriqué en acier moulé ou en fonte, constitue le centre du rotor sur lequel sont montées les pales. Ensuite, l'énergie des pales est redirigée vers la génératrice via un multiplicateur, si l'éolienne est équipée de celui-ci. Sinon, l'énergie mécanique est transférée directement vers la génératrice.

De manière générale, le même principe de portance utilisé pour les avions et les oiseaux selon l'Association mondiale de l'énergie éolienne (2011) est appliqué dans le cas des pales d'une éolienne. En effet, l'écoulement de l'air est plus lent en dessous de l'aile qu'au-dessus de celle-ci à cause du profil particulier de la pale, ce qui entraîne une différence de pression entre les deux faces de la pale (la pression est plus importante en dessous qu'au-dessus de l'aile). Ainsi, la force de portance est produite et la rotation du rotor est générée.

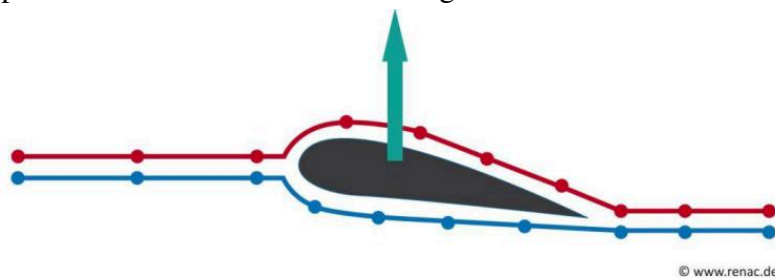


Figure I.20 Effet de portance au niveau de la pale grâce à la différence de pression [Renac 2018]

La plupart des pales d'éoliennes sont fabriquées à partir des matériaux composites de fibres de verre, de fibres de carbone, de bois et de métal. Ces couches sont alliées entre elles avec de la résine époxy. À cause de la lourdeur et de la fatigue du métal, les alliages d'aluminium et d'acier sont principalement employés uniquement sur les éoliennes de très petite taille.

I.1.5.2 La nacelle

Elle regroupe tous les éléments de l'éolienne tels que : l'arbre du rotor avec roulement, le multiplicateur, le ou les freins, l'accouplement, la génératrice, l'électronique de puissance, le système de refroidissement ou de réchauffement et une petite grue. Elle est soutenue par le mât et munie d'un système d'orientation lui permettant de tourner pour suivre la direction du vent.

Le multiplicateur quant à lui, il fait adapter la vitesse de rotation lente de la turbine (18-50 t/min) à la vitesse rapide de rotation de la génératrice qui en général de (1 500 t/min). La structure à plusieurs étages de ce dispositif lui autorise de s'adapter aux différentes conditions de vent.

Pour les systèmes de freinage : il existe des systèmes de freinage aérodynamique et des systèmes mécaniques.

La disposition des composants à l'intérieur de la nacelle est montrée sur la figure suivante :

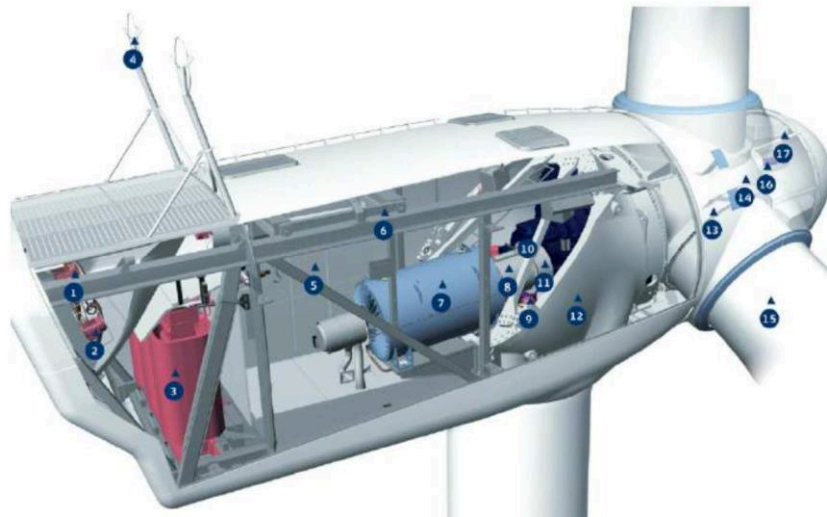


Figure I.21 Les composants de la nacelle d'une éolienne [Vestas 2019]

1-Refroidisseur d'huile	2-Refroidisseur d'eau	3-Transformateur	4-Capteur de vent
5 Convertisseur	6-Grue	7-Génératrice	8-Accouplement à disques
9-Dispositifs d'orientation	10-Multiplicateur	11-Frein	12-Fondation
13-Roulement des pales	14-Moyeu	15-Pale	16-Cylindre de calage
17-Contrôleur du moyeu			

I.1.5.3 Le système d'orientation

Il permet à la nacelle de s'orienter par des moteurs électriques dans la direction du vent, mesurée à l'aide d'une girouette fixée en haut de la nacelle, afin d'assurer une conversion efficace de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ce système est constitué des moteurs électriques.

I.1.5.4 Le mât

Aussi appelé une tour, il est généralement fabriqué en béton, en métal, en bois ou par une combinaison de ces matériaux. Les différents types de mâts sont listés ci-après :

- Une tour de forme tubulaire fabriquée en acier constituée de deux à quatre sections de 20 à 30 mètres chacune et équipées d'une bride aux deux extrémités. L'assemblage par des boulons est effectué sur le site.
- Une tour en béton constituée des tronçons fabriqués dans une usine de préfabrication du béton et assemblés directement dans le parc éolien. La tour peut être totalement construite sur le site par la technique de béton coulé sur place, appelée « coffrage grim pant ». Cependant, la construction du mât peut être arrêtée ou interrompue à cause de la baisse de température pendant l'hiver.
- Une tour en treillis constituée de plusieurs profils en acier. Cette structure permet de réduire le poids et le coût du mât. Cependant, les contrôles et les entretiens réguliers des profils en acier sont d'une grande nécessité.
- Les mâts hybrides sont des structures segmentées en béton et surmontées de sections tubulaires en acier. Ils offrent l'avantage d'être transportés aisément par des camions ordinaires.
- Les mâts tubulaires haubanés sont uniquement utilisés pour les petites éoliennes. Ces tours allient la légèreté et la facilité de montage sans grue.

Plusieurs facteurs sont mis en jeu pour déterminer la hauteur du mat convenable, à savoir : le potentiel éolien dans le site, le modèle d'éolienne prévu, le rendement énergétique souhaité, le coût de fabrication de la tour comptabilisé au mètre, la rugosité du sol (une tour de hauteur élevée est privilégiée dans le cas d'une rugosité à proximité du sol importante) ... et pour pouvoir atteindre la nacelle située en haut du mât, toutes les éoliennes sont munies d'escaliers et certaines possèdent des ascenseurs.

I.1.5.5 La fondation du mât

C'est une base permettant de garantir la stabilité de l'éolienne et de maintenir sa structure globale. Pour les éoliennes terrestres, le type de fondation le plus répandu est la fondation en dalle de béton sous terre, mais si le sous-sol manque de consistance, une fondation à pieux enfoncés dans le sol est possible.

En ce qui concerne les éoliennes « offshore », nous trouvons :

- Des caissons de fondation en béton placés sur le fond marin,
- Les fondations à trépied sont constituées de trois pieux en acier ancrant le mât dans le fond marin,
- Les fondations « bucket » qui consiste en une structure cylindrique en acier à fond ouvert placée sur le sol marin puis vidée par pompage,
- Le monopilot d'acier est un pieu unique enfoncé sur 10 à 30 mètres de profondeur dans le sol marin.

L'image suivante montre les différentes fondations pour les éoliennes offshore :

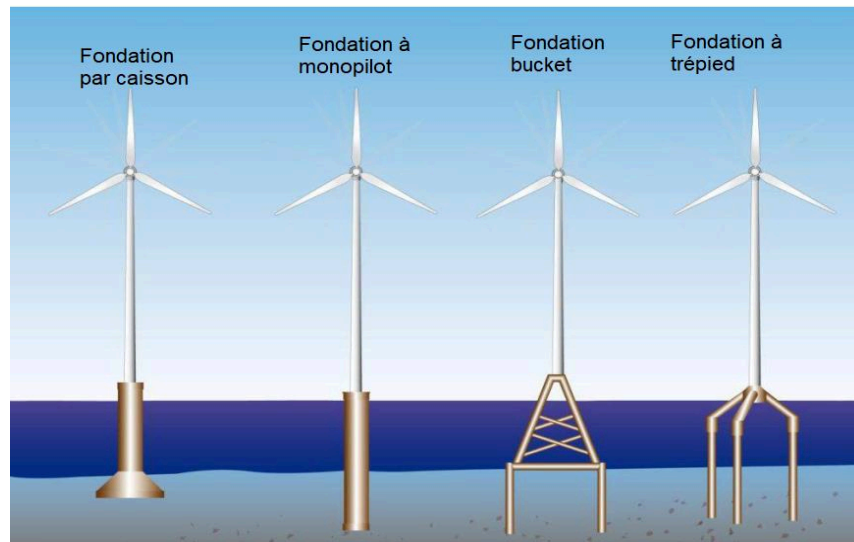


Figure I.22 Les fondations des éoliennes Offshore[offshore-stiftung, 2010]

2ème partie : État de l'art sur le diagnostic des défauts

En vue d'améliorer la disponibilité, la qualité et la sûreté de fonctionnement ainsi qu'à la réduction des coûts de fonctionnement et d'exploitation, en intervenant au cours des phases du cycle de vie du produit, les méthodes de diagnostic de défaillances, ont bénéficié d'un intérêt particulier des scientifiques et chercheurs, surtout, pour l'exploitation des Systèmes Automatisés de Production, dont la complexité est en constante évolution [VELLEMANS P. 2006].

Le diagnostic vise à détecter, à localiser et éventuellement à isoler les défaillances ou les défauts qui affectent un système. Il s'intègre dans le cadre plus général de la surveillance et de la supervision. La complexité des systèmes de production électrique notamment, les éoliennes, nécessite de prendre en considération des fonctions telles que la surveillance, la supervision et la gestion technique et la planification de la maintenance.

I.2.1 Terminologie relative au diagnostic

Vu la diversité et l'abondance des termes rencontrés dans le domaine de diagnostic des défauts, l'établissement d'une terminologie standardisée des notions de base, dans un premier temps, s'avère nécessaire. Dans cette deuxième partie, nous présentons les significations de quelques termes relatifs au domaine du diagnostic des défauts.

Le comité technique SAFEPROCESS de l'IFAC (*International Federation of Automatic Control*) ont standardisé cette terminologie en se basant sur les travaux reportés dans [Zwingelstein, 1995], [Isermann et Phalle, 2000] est listée ci-après :

✓ Défaut :

C'est toute déviation ou tout écart d'au moins une caractéristique observée du système surveillé par rapport à sa caractéristique de référence requise, correspondante à l'état de fonctionnement normal et standard. Un défaut ne provoque pas généralement un arrêt complet du système mais peut entraîner une probable défaillance. Un défaut peut être d'origine physique dû au dysfonctionnement des matériels, aux erreurs de conception, aux erreurs de conduite et d'utilisation opérationnelle des systèmes ou aux erreurs lors des actions de maintenance. Suite à un défaut, le système est incapable d'accomplir la fonction principale pour laquelle a été conçu. Un défaut ne conduit pas nécessairement une défaillance.

✓ Défaillance :

Est l'inaptitude d'un système physique à accomplir sa fonction principale ou une de ses fonctions. Une défaillance peut conduire à un défaut. Mais un défaut n'entraîne pas nécessairement une défaillance. Cela signifie, que le système peut toujours accomplir sa fonction principale tant que le défaut n'affecte pas cette tâche. La défaillance peut être partielle si le système conserve la capacité d'accomplir une partie de ses fonctions requises ou lorsqu'il les accomplit de façon

limitée, comme elle peut être complète lorsque le système est incapable d'accomplir toutes les fonctions requises.

✓ **Panne:**

Est un état qui se produit lorsque le système cesse d'assurer ses missions principales de façon permanente ou intermittente. Dans ce cas, le système ou le dispositif est signalé en état de panne. Une panne est toujours le résultat d'une défaillance. Par ailleurs, On peut distinguer entre deux types de pannes : une panne permanente, si elle entraîne l'état de non fonctionnement du composant ou du dispositif, ce qui nécessite une action de réparation ou de remplacement indispensable ; et une panne intermittente, qui résulte d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système. Le système peut restaurer son état de fonctionnement normal même après réparation de la panne. Mais, sans réparer le composant dégradé, une panne intermittente peut se transformer en une panne permanente du système.

✓ **Dégradation:**

Est un processus de diminution progressive des performances d'une entité fonctionnelle d'un dispositif.

✓ **Perturbation :**

Est toute entrée non contrôlée, issue de l'environnement extérieur, influençant de façon négative sur un système physique.

✓ **Anomalie :**

Caractérise un comportement du système physique, non conforme à une référence.

✓ **Symptôme :**

Représente un signe distinctif permettant de détecter un dysfonctionnement du système surveillé.

✓ **Diagnostic :**

Est un processus permettant de détecter l'occurrence d'un défaut à un moment précoce avant qu'il ne conduise à une défaillance, en s'appuyant sur les mesures et les observations effectuées sur le système surveillé. Il inclut aussi l'étape de localisation et d'identification du défaut. Son acronyme anglais est FDI (Fault Detection and Isolation), la procédure de diagnostic comporte trois étapes essentielles, décrites ci-après :

- **Détection du défaut :** cette étape permet de décider si le système surveillé est en fonctionnement normal ou non.
- **Localisation de défaut :** consiste à déterminer avec précision le composant ou le sous-système fonctionnel, affecté par le défaut détecté.

- **Identification ou Isolation du défaut :** est la dernière étape du processus de diagnostic, elle consiste à déterminer l'amplitude / l'ampleur, le type et l'instant d'occurrence du défaut constaté, afin de comprendre au mieux le comportement du système en étude.

✓ **Pronostic :**

Est une projection de l'état de fonctionnement du système dans le future, en s'appuyant sur le degré de gravité du défaut, ses conséquences et ses causes, l'évolution du défaut habituellement observée pour des événements similaires.

✓ **Résidu :**

C'est un signal indicateur de défaut, il représente l'écart entre le fonctionnement réel ou observé du système et le fonctionnement normal ou standard donné par un modèle de référence. Cet indicateur a une moyenne statistiquement égale à zéro en l'absence du défaut et une moyenne différente de zéro en sa présence.

✓ **Surveillance :**

Est un module permettant de surveiller et de garder un œil ouvert sur l'état de fonctionnement d'un système, en s'appuyant sur les données collectées en continu et en temps réel sur celui-ci. Ces données sont traitées et exploitées en vue de détecter les changements de comportement du procédé causés par des défauts ou par des défaillances. Dans ce cas, les agents de maintenance sont intervenus pour pouvoir agir et prendre une décision. En outre, les données sont transférées au module de supervision. La surveillance de la commande et la surveillance du système sont les deux types de surveillance existants.

✓ **Supervision :**

Selon la définition du Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine, la supervision est l'ensemble des outils et méthodes qui permettent de conduire des installations industrielles tant en fonctionnement normal qu'en présence de défaillances ou de perturbations.

✓ **Aide à la décision :**

Consiste à aider l'opérateur à prendre la bonne décision devant toute situation, et cela en proposant une liste d'actions qui pourrait restaurer les grandeurs optimales du système. Dans cette étape, l'opérateur est toujours maître de la situation, car le système d'aide à la décision n'agit jamais, mais informe et conseille seulement.

✓ **Maintenance :**

Est une étape qui vient généralement après l'étape de prise de décision. Elle consiste à maintenir ou à restaurer les performances des composants ou du système d'une façon globale, pour l'accomplissement de sa tâche requise.

La surveillance et le diagnostic permettent améliorer la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité d'une entité fonctionnelle. Ces différents concepts sont définis par :

- **Fiabilité** : capacité d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée.
- **Disponibilité** : Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données.
- **Maintenabilité** : Aptitude d'un système à être remise en état par une maintenance adaptée afin d'accomplir des fonctions requises dans des conditions données.

I.2.2 Étapes de la procédure de diagnostic

La procédure de détection et de localisation des défauts qui passe par plusieurs étapes essentielles : [Chafouk 2016]

- **Étape initiale de définition du périmètre de diagnostic (objectifs/besoins) :**

Dans cette étape initiale, Il s'agit de définir les objectifs recherchés, et les besoins nécessaires au développement d'un système de diagnostic :

- Types de défauts recherchés : actionneur/processus/capteur,
- Disponibilité ou non d'un modèle du système,
- Grandeurs physiques à mesurer,
- Conditions environnementales et de fonctionnement du système à l'état sain.

- **Étape de génération des résidus ou d'identification d'indicateurs pertinents :**

Cette étape consiste à générer des résidus ou identifier des indicateurs pertinents. Ces résidus/indicateurs élaborés seront analysés dans l'étape suivante qui est la détection.

- **Étape de détection :**

La détection de pannes est souvent suivie d'une procédure de localisation de pannes, permet d'isoler le défaut et donc de déterminer quelle partie du système est affectée par l'anomalie (défaut actionneurs, défaut système et défaut capteurs).

- **Étape de localisation et d'identification de défaut :**

Cette étape de diagnostic localise le défaut détecté en l'attribuant à un élément du système : actionneur, capteur, ou composants du processus. Cette attribution passe par la disposition d'une base de connaissances des signatures des défauts (stratégie sans modèle), ou par une structuration des résidus de manière à ce qu'ils soient affectés que par un type de défaut particulier (stratégie avec modèle).

I.2.3 Classification des défauts

Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation en trois types : défaut actionneur, défaut capteur et défaut système (ou défaut composant), selon leurs évolutions temporelles en défaut abrupt, défaut intermittent et défaut graduel et finalement selon leurs influences sur le système, nous trouvons les défauts additifs et les défauts multiplicatifs.

I.2.3.1 Selon la localisation du défaut

a. Défauts capteurs

Ils affectent les instruments mesurant une grandeur physique donnée et la transforment en une grandeur traitable par les calculateurs. Ils constituent l'interface de sortie entre le système et l'environnement extérieur, qui communique les informations sur l'état interne du système. Un défaut capteur se traduit par une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer. Les défauts capteurs les plus rencontrés sont : le biais, la dérive, la perte d'efficacité, le blocage et le défaut de calibrage. La figure suivante présente ces différents types de défaut capteur :

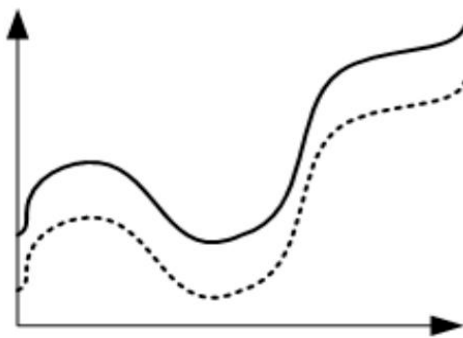


Figure I.23 Défaut capteur-Le biais

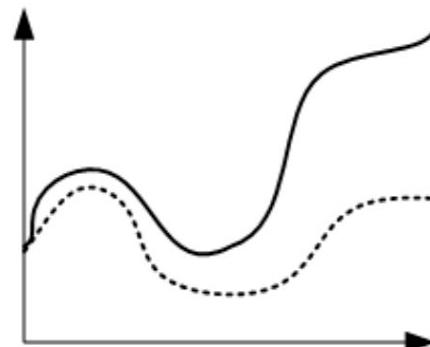


Figure I.24 Défaut capteur- La dérive

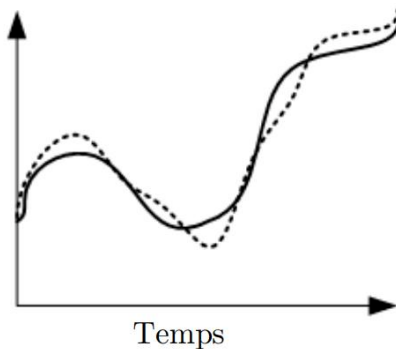


Figure I.25 La perte d'efficacité

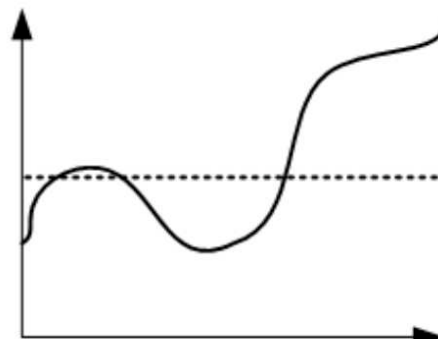


Figure I.26 Le blocage

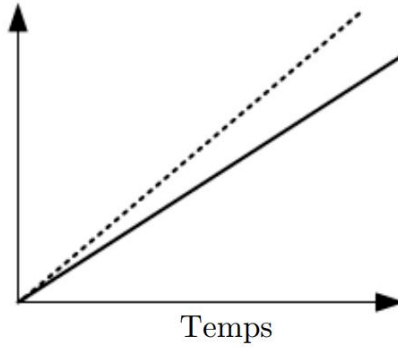


Figure I.27 Le défaut de calibrage

Les lignes en pointillées correspondent aux valeurs mesurées par le capteur, tandis que les lignes en trait continu désignent les valeurs réelles.

b. Défauts actionneurs

Ils interviennent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent la perte totale ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Un défaut actionneur peut entraîner une consommation élevée de l'énergie et une perte totale de contrôle.

Les défauts actionneurs les plus répandues [Ducard 2009] sont présentés ci-dessous :

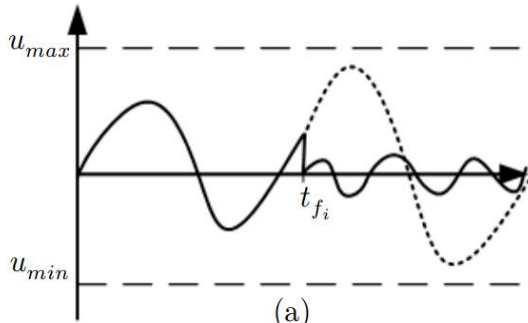


Figure I.28 L'oscillation

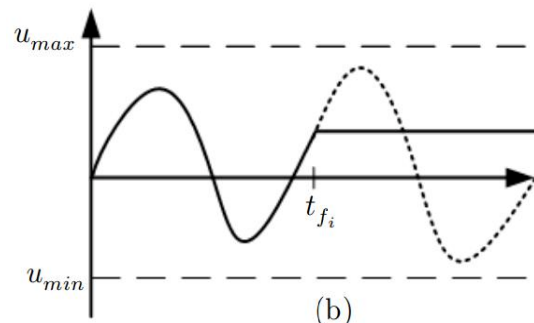


Figure I.29 Le blocage

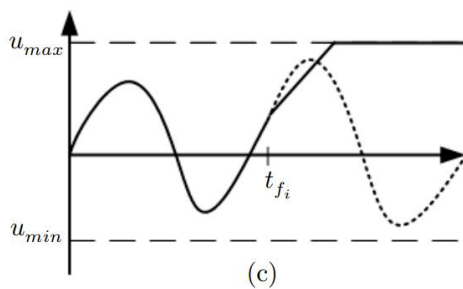


Figure I.30 Saturation

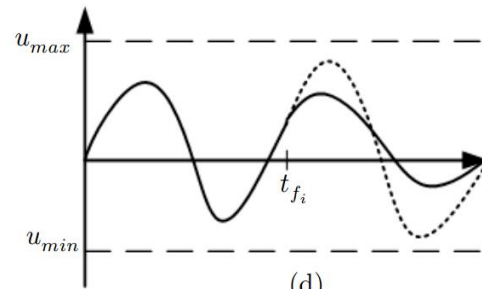


Figure I.31 Perte d'efficacité

Les lignes en pointillées correspondent aux valeurs mesurées par le capteur, tandis que les lignes en trait continu désignent les valeurs réelles.

Les équations mathématiques des défauts actionneurs sont comme suit :

$$u_a^i(t) = \begin{cases} u_c^i(t) & 0 < \xi_i < k_i(t) < 1, \forall t \geq t_{f_i} & \text{sans défaut} \\ k_i \cdot u_c^i(t) & \forall t \geq t_{f_i} & \text{perte d'efficacité} \\ 0 & \forall t \geq t_{f_i} & \text{oscillation} \\ u_c^i(t_{f_i}) & \forall t \geq t_{f_i} & \text{blocage} \\ u_{i \min} \vee u_{i \max} & \forall t \geq t_{f_i} & \text{saturation} \end{cases} \quad \text{I.5}$$

Avec :

$u_c^i(t)$ est le signal de sortie de l'actionneur, $u_c^i(t)$ est le signal d'entrée du $i^{\text{ème}}$ actionneur, t_{f_i} désigne le temps d'occurrence d'un défaut à l' $i^{\text{ème}}$ actionneur ; k_i est l'efficacité de l'actionneur, $\xi_i > 0$ est l'efficacité minimale; $u_{i \min}$ et $u_{i \max}$ sont respectivement les limites supérieures et inférieures du signal de sortie de l' $i^{\text{ème}}$ actionneur.

c. Défauts composants

Ce type de défaut provient des éléments internes du système. Un défaut procédé résulte de la casse d'un composant du système et réduit les capacités de celui-ci à effectuer une fonction définie. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit.

I.2.3.2 Selon l'évolution temporelle du défaut

Les défauts peuvent être classés selon leurs évolutions temporelles [Isermann et al., 2002] :

- Abrupt : survient lorsqu'il y a une discontinuité temporelle du comportement de l'élément en question. Il correspond à une panne brutale (arrêt total ou partiel d'un élément). Une représentation mathématique de ce défaut est donnée par :

$$f(t - t_{f_i}) = \begin{cases} \delta & t > t_{f_i} \\ 0 & t < t_{f_i} \end{cases} \quad \text{I.6}$$

Avec : $f(t - t_{f_i})$ est le comportement temporel du défaut ; δ est un seuil constant

- Intermittent : Ce type de défauts caractérise les faux contacts, il possède la caractéristique spécifique que le signal revient de façon spontanée à sa valeur normale.
- Graduel : Ce défaut est caractérisé par une évolution temporelle lente, la chose qui le rend difficilement détectable, il survient suite à un encrassement ou une usure d'une pièce. Ce défaut peut être exprimé mathématiquement par l'équation suivante :

$$f(t - t_{f_i}) = \begin{cases} \delta \cdot (1 - e^{-\alpha(t-t_{f_i})}) & t \geq t_{f_i} \\ 0 & t < t_{f_i} \end{cases} \quad \text{I.7}$$

Avec : δ et α sont des constantes positives.

Les différents types de défauts selon leur évolution temporelle sont présentés sur la figure suivante [Methnani 2013] :

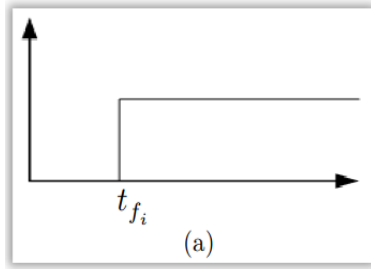


Figure I.32 Défaut abrupt

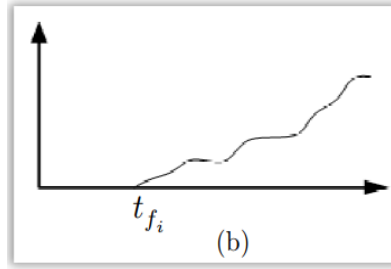


Figure I.33 Défaut graduel

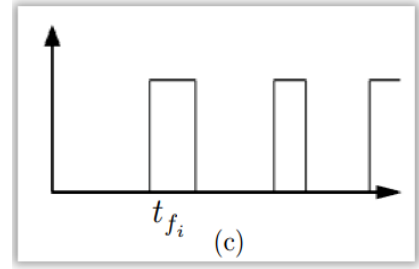


Figure I.34 Défaut intermittent

I.2.3.3 Selon leur impact sur les performances du système :

Les défauts aussi peuvent être classés en effets sur les performances du système. Les défauts capteurs et actionneurs sont généralement modélisés par des défauts additifs, tandis que, les défauts système sont modélisés par des défauts multiplicatifs.

I.2.4 Classification des méthodes de diagnostic

Plusieurs classifications des méthodes de diagnostic des défauts ont été proposées dans la littérature : [Isermann 2006] ; [Dash et Venkatasubramanian 2000] ; [Venkatasubramanian et al., 2003] ; [CHAFOUK 2007b]. En partant du point de vue applicative, nous avons adopté dans cette thèse la classification des méthodes de diagnostic suivante :

- Méthode à base de modèle,
- Méthode à base de traitement de signal,
- Analyse statistique des données.

La figure suivante montre la classification adoptée des méthodes de diagnostic :

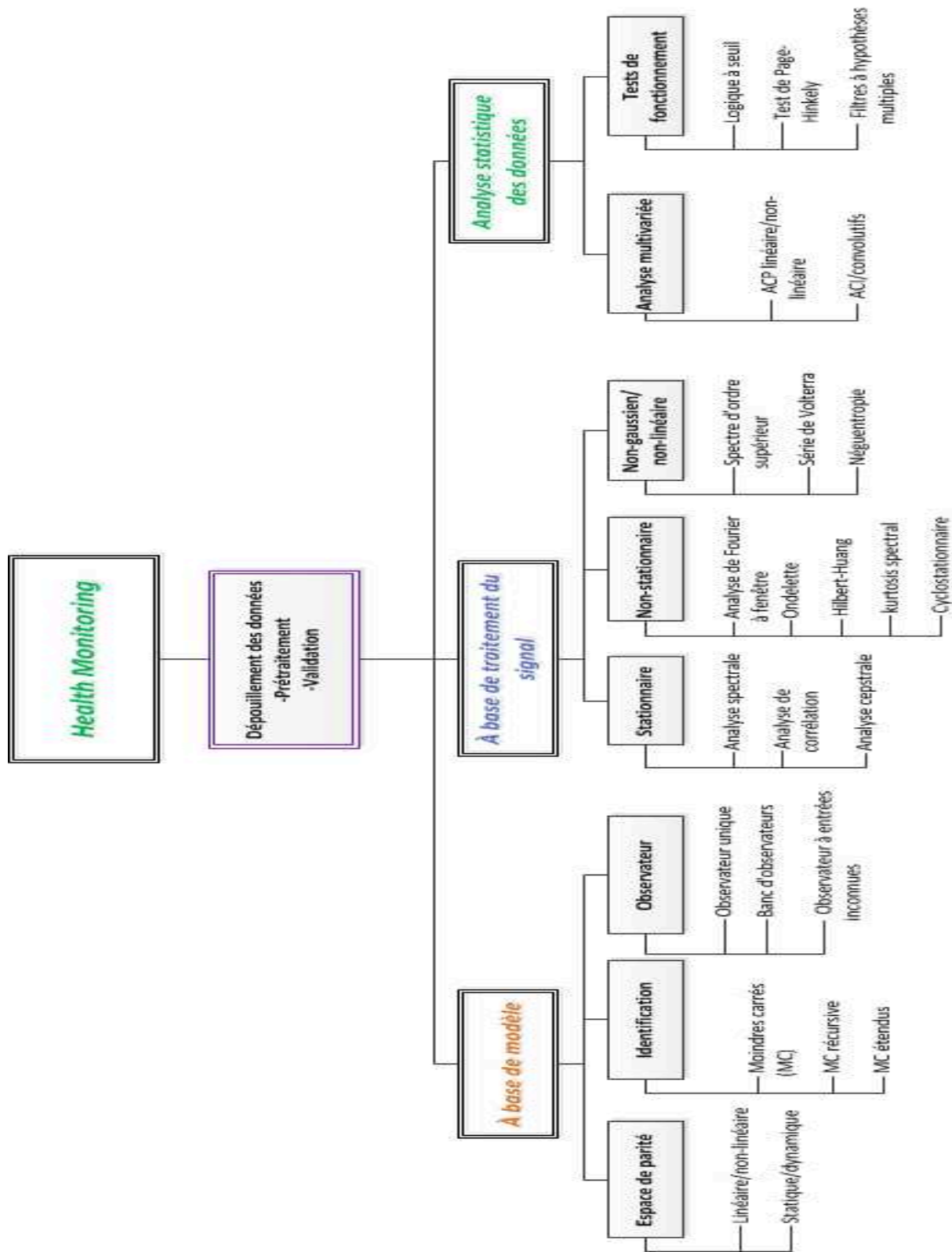


Figure I.35 Techniques de diagnostic des défauts [Chafouk 2016]

I.2.4.1 Méthodes à base de modèle

L'emploi des modèles des systèmes pour des fins de diagnostic de leurs défauts, est apparu au début des années 70. Dans ce sens, plusieurs travaux ont été développés et proposés [Willsky, 1976] ; [Basseville 1988] ; [Gentil 1997] ; [Isermann et Balle 1997] ; [Fussel et Isermann 1998]. Le travail de [Frank 1996] et les livres comme [Patan 2008] ; [Chiang et al. 2001], ont donné une vue complète sur ces méthodes de diagnostic à base de modèles. La majorité de ces méthodes utilisent le concept de la redondance matérielle ou physique et de la redondance analytique.

Ces méthodes à base de modèles reposent sur le principe de comparaison des mesures effectuées sur le système réel avec les valeurs des variables correspondantes calculées analytiquement à l'aide des mesures des autres variables actuelles ou/et précédentes, ainsi que le modèle mathématique décrivant le système en fonctionnement normal. Ce principe peut être aussi appliqué dans le cas de comparaison de deux variables calculées par méthode analytique. L'écart obtenu suite à cette comparaison dans les deux cas, est appelé Résidu, il indique l'apparition d'un défaut sur le système.

Même en absence des défauts, les résidus ne sont jamais nuls à cause de la présence du bruit de mesures et des erreurs de modélisation. Alors, pour pouvoir détecter l'occurrence du défaut, un seuil doit être défini théoriquement ou empiriquement. La génération de ces résidus peut se faire selon trois grandes approches :

- La redondance matérielle ou analytique (espace de parité),
- L'estimation d'état,
- L'estimation des paramètres.

Les méthodes à base de modèles sont plus performantes que celles basées sur le traitement de signal ou sur les approches d'analyse statistique des données [Frank 1998] :

- Les coûts réduits de développement et de maintenance,
- Les symptômes et les défauts ne doivent pas être anticipés,
- La connaissance du système et la connaissance de diagnostic sont découplées,
- Les données sur le comportement normal sont prises en considération.

Les approches de diagnostic à base de modèle par espace de parité, par estimation paramétrique, et par estimation d'état ou par observateurs, sont présentées dans ce qui suit :

- **Espace de parité** : cette méthode permet de vérifier la parité ou la cohérence du modèle du système avec les mesures issues des capteurs et des entrées connues générées par les actionneurs. L'approche par espace de parité a été initialement utilisée et a été réalisée à partir des relations de parité statiques [Daly et al. 1979]. Ensuite, elle a été généralisée par [Mironovski 1980], puis par [Chow et Willsky 1984]. Dans le cadre général, l'approche consiste à trouver une matrice de projection des entrées et les sorties du système dans un

sous espace indépendamment des états du système, ce qui revient à éliminer l'influence des états sur les résidus.

Les relations de parité se caractérisent par le fait qu'elles lient que les variables connues : entrées et sorties. Elles peuvent être soit du type : statique : ce sont des relations entre les différentes entrées et sorties du système à un instant k , soit du type dynamique : lorsqu'il y a une liaison dynamique entre les sorties mesurées et les entrées du système à différents instants. Cette méthode utilise les outils de l'algèbre linéaire, notamment les projections matricielles afin d'éliminer les variables d'état inconnues [Isermann 2006].

Dans le cas où le modèle du système à surveiller est non-linéaire, les relations de parité sont aussi utilisables. Mais le résidu généré est sous forme d'une fonction contrainte indépendante de l'état du système.

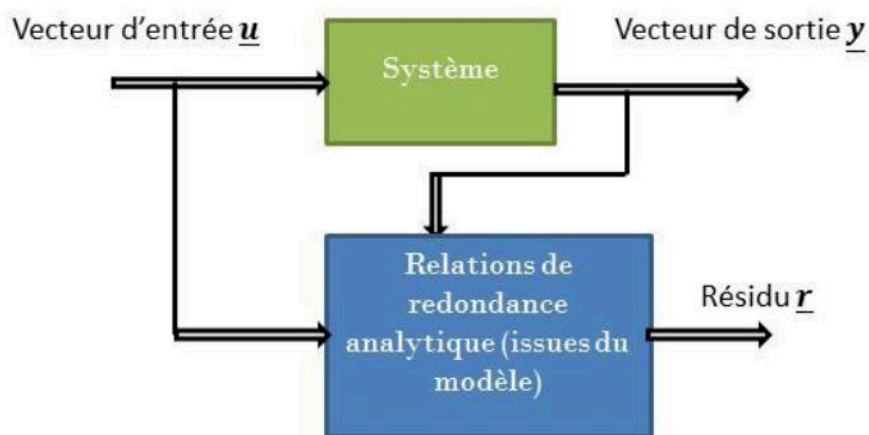


Figure I.36 Schéma de génération du résidu par l'espace de parité [Chafouk, 2016]

- **Estimation paramétrique** : cette méthode permet d'estimer en ligne de façon répétitive les paramètres du système, en utilisant les mesures d'entrées, de sorties et le modèle de référence du système en fonctionnement normal. L'écart entre l'estimation des paramètres et les valeurs correspondantes de référence de l'état normal du procédé indique l'apparition d'un défaut [Isermann 1984] ; [Isermann 1991]. De nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine, notamment les travaux de Basseville [Basseville 1987], Benveniste [Benveniste 1987], Delmaire [Delmaire 1994] et Gertler [Gertler 1995]. Pour les systèmes nonlinéaires [Isermann 2006], dans le domaine de l'automobile [Constantinescu et al. 1995] ; [Dinca et al. 1999] et pour l'application satellite [Jiang 2002].

La figure suivante présente le principe de génération des résidus par l'approche d'estimation paramétrique :

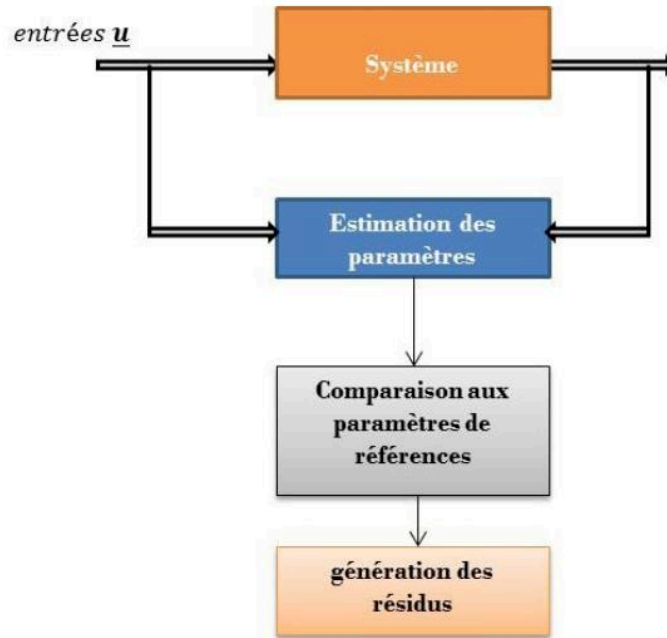


Figure I.37 Approche de génération de résidus par l'estimation paramétrique [Chafouk 2016]

- Observateurs ou Estimation d'état :

Cette technique est basée sur l'utilisation des observateurs, qui estiment les états internes du système à partir de ses entrées (ou une partie de l'entrée), de ses sorties (ou une partie de la sortie). L'erreur d'estimation est utilisée comme résidu pour le diagnostic de défauts. En absence de défauts, la moyenne des résidus est statiquement nulle alors qu'à leur présence, le résidu devient différent de zéro. Une banque d'observateurs est conçue pour générer un sous ensemble de résidus sensibles à un défaut donné, facilitant ainsi la localisation des défauts. Ces observateurs peuvent être structurés selon un Schéma d'Observateur Simplifié (SOS), selon un Schéma d'Observateur Généralisé (GOS) ou un Schéma d'Observateur Dédié (DOS).

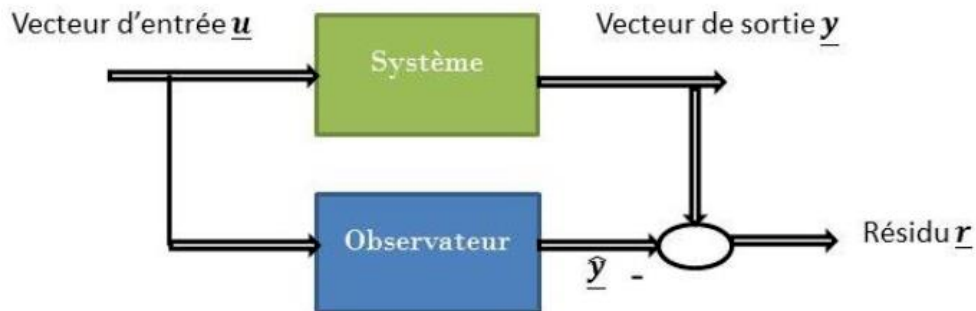


Figure I.38 Principe de génération d'un résidu par observateur [Chafouk 2016]

Après avoir choisi la structure de l'observateur (SOS/DOS/GOS), ce dernier doit être conçu.

La conception de l'observateur dépend du modèle du système à surveiller : s'agit-il d'un modèle linéaire ou non linéaire ? d'un contexte déterministe ou stochastique de la représentation d'état ?

L'observateur de Luenberger linéaire ou non linéaire est utilisé dans un domaine déterministe où le bruit d'état et de sortie ne sont pas considérés. Tandis que dans un contexte stochastique où le bruit de sortie et de l'état sont pris en compte et modélisés selon une distribution gaussienne, le filtre de Kalman est employé. Lorsque le modèle du système à surveiller est linéaire, le filtre de Kalman (FK) est appliqué et dans le cas non linéaire, le filtre de Kalman étendu (Extended Kalman Filter) ou le filtre de Kalman sans parfum (Unscented Kalman Filter) sont couramment utilisés. Le filtre de Kalman étendu [GLIGA 2017] consiste en une linéarisation autour d'un point de fonctionnement des fonctions nonlinéaires de l'état et de sortie [Chang 1995]. Par ailleurs, le filtre de Kalman sans parfum permet de réaliser une approximation de la densité de probabilité par la sélection d'un ensemble de points en utilisant la transformée sans parfum [Julier 2004]. Dans le cas non-linéaire et non-Gaussien, l'utilisation de l'EKF et de l'UKF pour le diagnostic n'est plus possible. Ceci revient au fait qu'un filtre de Kalman utilise les statistiques d'ordre deux. Les simulations de Monte Carlo, connus sous le nom de filtres particulaires (FP) permettent de répondre à cette problématique [Doucet 2001]. Ils s'appuient les hypothèses statistiques, notamment sur la loi des grands nombres. Des travaux ont été entrepris par le biais des FP afin de répondre à des problématiques de diagnostic [Ba 2010] ; [Orchard 2006]. La figure suivante résume l'étape de structuration des observateurs et aussi l'étape de leur conception :

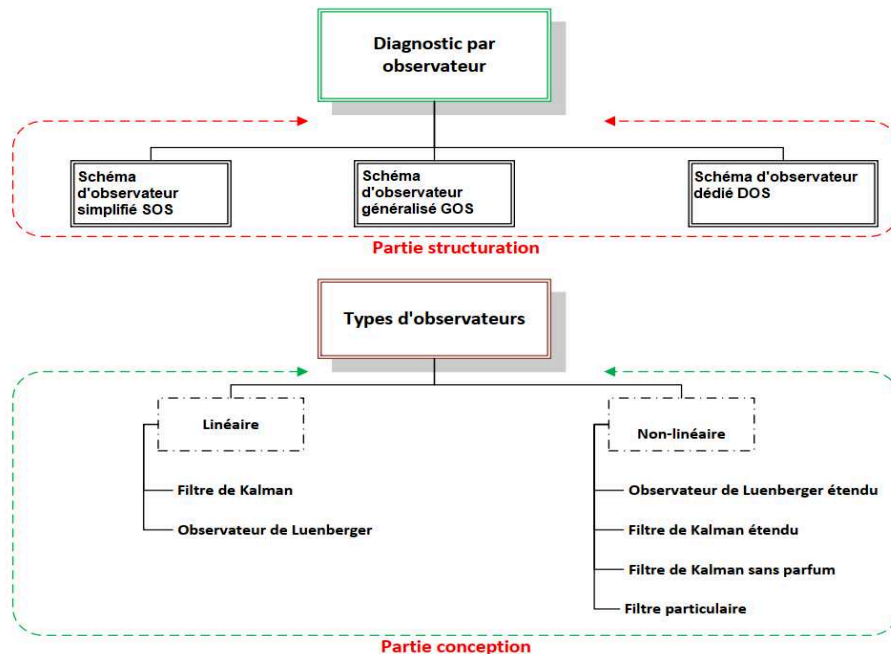


Figure I.39 La structure des observateurs et leur conception [Chafouk 2016]

I.2.4.2 Méthodes sans modèle

Les méthodes basées sur l'analyse statistique des données et sur leur traitement exploitent les données historiques correspondant aux divers modes de fonctionnement du système. Parmi ces méthodes, nous citons :

- **Analyse en composantes principales** : est une méthode statistique multi-variable, qui consiste à réduire la taille de l'éventail des données.
- Elle est considérée comme étant une technique de projection orthogonale linéaire qui projette les observations multidimensionnelles représentées dans un espace de dimension n , avec n est le nombre de variables observées dans un sous espace de dimension $q < n$, en maximisant la variance des projections (ou en minimisant l'erreur quadratique d'estimation).
- **Analyse spectrale** : dans le fonctionnement normal, certaines mesures possèdent un spectre fréquentiel spécifique. Tout écart des spectres fréquentiels d'un signal indique l'apparition d'un défaut. Cette méthode est intéressante pour l'analyse des signaux qui montrent des oscillations avec des périodes longues (les débits, les pressions...). Une technique d'aide à la décision permet de détecter et de localiser l'élément défaillant du système. Parmi les procédures de décision appliquées sur un échantillon de mesures on peut citer : le test empirique de franchissement de seuil, test de variance, le test de la moyenne, test statistique Page-Hinkley ... [Basseville 1997]
- **Reconnaissance de forme** : cette méthode permet d'évaluer automatiquement la forme d'un objet en la comparant à un objet de référence. Dans le cas de diagnostic, on associe une classe formée par un ensemble d'observations à chaque mode de fonctionnement : par exemple, la classe C_1 caractérise le fonctionnement normal du système, la classe C_2 pour désigner le fonctionnement dégradé du système et la classe C_3 pour le fonctionnement défaillant. Le diagnostic donc consiste à attribuer une classe à toute nouvelle observation. Il s'agit donc de rechercher des frontières entre les classes qui minimisent l'erreur de classification, notamment la distance euclidienne peut être utilisée comme étant le critère de décision.

Une étude récente [Zhou 2019] a classé les méthodes FDI dans deux catégories : les techniques de diagnostic hors-ligne et les techniques de diagnostic en ligne. Par le diagnostic hors ligne, nous entendons le diagnostic effectué lorsque les systèmes à diagnostiquer ne sont pas utilisés. En revanche, le diagnostic en ligne fait référence au diagnostic pouvant être effectué lors du fonctionnement des systèmes.

1. Techniques de diagnostic hors-ligne : reposent sur le test d'un ensemble d'entrées soigneusement sélectionnées et relatives à certains défauts et ensuite sur l'analyse des résultats obtenus de ces tests. Lorsqu'il n'y a pas de divergence entre les résultats réels et attendus, la procédure de diagnostic est conclue. La table des défauts est largement utilisée dans ce type de techniques pour concevoir une séquence de vecteurs de test.

Soit A une table de défauts de taille $(n \times m)$ et donnée par: $A = (a_{ij})$, elle est définie par rapport à un ensemble de défauts $\{f_1 \ f_2 \ f_3 \dots f_n\}$ avec un ensemble de vecteurs de test $\{t_1 \ t_2 \ t_3 \dots t_m\}$. Les éléments de la matrice A sont exprimés ainsi :

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } t_j \text{ teste pour } f_i \\ 0, & \text{si } t_j \text{ ne teste pas pour } f_i \end{cases} \quad \text{I.8}$$

Avec :

t_j teste pour f_i veut dire que si f_i est actif pendant l'application du test t_j , nous pouvons détecter sa présence.

Ainsi, étant donné la matrice de table de défauts, une séquence de vecteurs de test peut être sélectionnée en conséquence pour discriminer ces défauts présumés. Toutefois, il est à noter qu'il se peut qu'un défaut soit inactif lorsque le test correspondant est appliqué. Par conséquent, afin de s'assurer qu'un défaut intermittent n'est pas présent, ni actif, il est nécessaire de répéter plusieurs fois la séquence de tests. Mais, puisque le temps total et le coût total disponible pour les tests sont toujours limités, il est lourd de répéter ces tests.

2. Techniques de diagnostic en ligne : Pour les systèmes industriels complexes modernes, une grande attention est accordée aux techniques de diagnostic en ligne. Ces méthodes peuvent être classées selon la figure suivante :

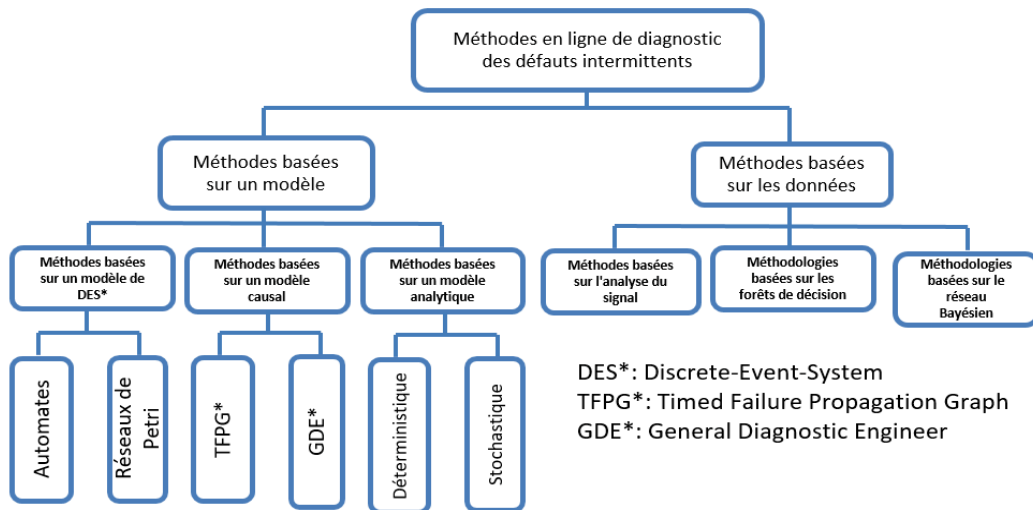


Figure I.40 Techniques en ligne de diagnostic des défauts [Zhou 2019]

Les approches FDI basées sur un modèle utilisent le modèle système comme une connaissance a priori pour surveiller la cohérence entre les processus réels et les comportements prédits par le modèle. Le modèle requis peut être établi par des principes de base, des mécanismes physiques ou des techniques d'identification de systèmes. Selon le type de modèle utilisé, les approches FDI existantes basées sur un modèle peuvent être classées en trois catégories :

- **Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés (DES) [Derbel 2009] :**

Les travaux de recherche s'intéressant au diagnostic des systèmes à événements discrets (SED) ont montré l'importance de l'information temporelle. Il s'est avéré que ce facteur temps souvent porte beaucoup d'informations pour l'accomplissement de la détection et du diagnostic. Les modèles ayant cette propriété sont dits temporisés. Parmi ces modèles, nous pouvons citer les automates temporisés et les Réseaux de Petri temporels.

- Les automates temporisés ont été introduits en 1990 par R. Alur et D. Dill. Ce sont des automates classiques disposant d'un ensemble de variables réelles, appelées horloges, qui évoluent de manière continue et synchrone avec le temps. A chaque transition est associée une condition sur la valeur des horloges, dite garde. Cette condition précise le temps d'exécution de la transition, et lorsque la transition est franchie, un ensemble d'horloges sont remises à zéro. Chaque état discret contient un invariant (une contrainte sur les horloges) qui restreint le temps d'attente dans l'état et donc force l'exécution d'une transition.
- Le modèle réseau de Petri temporel [Merlin 1974] est une extension du modèle réseau de Petri qui associe deux dates min et max à chaque transition. En effet, si une transition t a été sensibilisée pour la dernière fois à une date θ , alors t ne peut pas être franchie avant la date $\theta + min$ ou après la date $\theta + max$, sauf si une autre transition a désensibilisé t avant que celle-ci ne soit franchie. Les RdPs temporels expriment des spécifications "en délais" qui sont largement utilisées dans la description de l'évolution temporelle des processus industriels.

- **Diagnostic à base de modèles causaux :**

Un modèle causal permet la représentation graphique des liens de causalité entre les variables d'intérêt. Il met en évidence la dynamique et la structure du système [Montmain 2000]. Le diagnostic à base d'un modèle causal, vise à évaluer les performances du système en comparant les données actuelles aux données du fonctionnement nominal du système. Ces indicateurs permettent en général, de déceler les symptômes facilitant la détection et l'isolation de la ou les partie(s) défaillante(s) du système. Le modèle de causalité permettra d'évaluer la cause du défaut ainsi que son impact sur les sous-systèmes dont les performances sont associées aux indicateurs de performances [Cheng 2011].

- **Diagnostic à base de modèles analytiques :**

Les modèles analytiques se basent sur les équations mathématiques de base de la théorie régissant un phénomène et les étudient sur une représentation abstraite du système réel, prenant en compte tout ou partie de la géométrie de la structure analysée. Malgré son manque relatif de précision, dépendant du nombre de facteurs pris en compte pour modéliser le phénomène étudié, la modélisation analytique est parfois la première approche à mettre en place dans toutes les études. En effet, celle-ci permet de disposer d'un outil de simulation rapide. Si l'on fait varier les hypothèses sur des valeurs déterminées (choisies), on a un modèle déterministe. Si on peut varier une ou plusieurs hypothèses de façon totalement aléatoire on a un modèle dit stochastique.

Les méthodes de diagnostic basées sur les données (sans modèle) : les approches basées sur les données constituent un outil efficace de diagnostic des défauts pour de nombreuses applications industrielles complexes. Ces méthodes nécessitent la sélection d'un grand nombre de données historiques sur les systèmes à diagnostiquer à la place de l'établissement d'un modèle connu a priori du système. Sur la base des données historiques disponibles, la connaissance du système sous-jacent peut être extraite, puis la procédure de diagnostic FDI est réalisée en vérifiant si les données d'exploitation en temps réel sont constituées de la connaissance. Les méthodologies existantes FDI basées sur les données sont présentées brièvement ci-dessous :

- **Arbres de décision :**

Un arbre de décision est un outil d'aide à la décision représentant un ensemble de choix sous la forme graphique d'un arbre. Les différentes décisions possibles sont situées aux extrémités des branches (les « feuilles » de l'arbre), et sont atteintes en fonction de décisions prises à chaque étape. L'arbre de décision est un outil utilisé dans des domaines variés tels que la sécurité, la fouille de données, la médecine, etc. Il a l'avantage d'être lisible et rapide à exécuter. Il s'agit de plus d'une représentation calculable automatiquement par des algorithmes d'apprentissage supervisé.

- **Réseaux Bayésiens :**

Les réseaux bayésiens sont de graphes acycliques orientés où les variables sont représentées par des nœuds et les relations de dépendance ou de corrélation entre les variables sont représentées par des arcs directionnels.

Parmi les avantages tirés de l'utilisation d'un réseau bayésien, on trouve qu'il :

-peut utiliser des données partielles ou incomplètes; permet l'étude des relations causales et l'influence directe d'une variable sur l'autre; combine l'estimation d'experts et les données statistiques pour mieux évaluer la causalité permettant de mettre ensemble toutes les sources de données disponibles, subjectives aux objectives; couvre le raisonnement cause à effet de façon transparente et documentée ; il permet l'analyse de type « what if »; permet l'acquisition, la représentation et l'utilisation de connaissance.

Parmi les limitations d'un réseau bayésien, on trouve : la grande complexité d'intégration dans un cadre basé seulement sur l'opinion des experts ; la lourdeur des graphes et les algorithmes de calcul dans les réseaux complexes ; la difficulté de travailler avec les variables continues.

- **Traitement de signal :**

Cette approche repose sur le principe de modification des caractéristiques des grandeurs électriques ou mécaniques mesurables d'un système suite à l'apparition d'un défaut [Vaseghi 2010]. Ces caractéristiques possèdent des profils temporels et fréquentiels connus correspondant à un état normal ou bien à des défaillances connues. En comparant les signatures de référence et courantes issus du système, nous parvenons à détecter la présence ou non d'un défaut [Khov 2009], [Trigeassou 2013], [Crombez 2011]. Ces outils sont classés en quatre catégories selon leur domaine d'application : temps, fréquences, temps-fréquence ou temps-échelle [Razafindrazato 2010]. Plus de détails sur les différents outils de traitement du signal sont présentés dans les références [Crombez 2011], [Razafindrazato 2010]. L'inconvénient majeur d'une telle approche est sa forte dépendance de la méthode d'analyse adoptée durant la phase de traitement ainsi qu'à la fréquence et le nombre d'échantillonnage durant la phase d'acquisition de données.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté dans la première partie la situation de l'énergie éolienne dans le monde, dans l'union européenne et au Maroc. Nous avons défini les notions élémentaires relatives à l'énergie éolienne, nous avons décrit le principe de fonctionnement des éoliennes. Nous avons aussi énuméré les types existants des éoliennes et nous avons présenté les composants constituant les éoliennes à axe horizontal et à vitesse variable.

Dans la 2^{ème} partie porte sur l'état de l'art sur le diagnostic de défauts des systèmes : nous avons défini les termes rencontrés dans le domaine de diagnostic de défauts, ensuite les défauts des systèmes sont classifiés selon leur localisation, selon leur évolution temporelle et en fonction de leur impact sur les performances des systèmes à surveiller. En outre, une classification des méthodes de diagnostic de défauts est établie.

L'objectif de nos travaux est d'élaborer des méthodes de diagnostic pour le diagnostic des défauts capteurs, actionneurs et composants de la génératrice du type asynchrone doublement alimentée, utilisée dans un système éolien variable.

Vu les avantages énormes des méthodes de diagnostic à base de modèle, nous avons opté pour l'utilisation de ces méthodes employant les observateurs de Kalman pour la génération des résidus. Donc le prochain chapitre va être consacré pour l'établissement du modèle mathématique de la MADA.

Chapitre II Modélisation et Commande d'une Éolienne à Vitesse Variable, basée sur une Machine Asynchrone Doublement Alimentée

II.1 Introduction

L'élaboration des méthodes de diagnostic à base de modèles des systèmes industriels requiert une phase préliminaire importante qui est la modélisation analytique du système lorsqu'il est en bon fonctionnement. On distingue deux grandes familles de modèles [Isermann 2006] ; la première catégorie est connue sous le nom de boîte blanche et les modèles utilisés sont des modèles de connaissance reposant entièrement sur les lois physiques régissant le système. La deuxième catégorie est celle de représentation ou appelée boîte noire, elle décrit le comportement dynamique du système par le moyen des relations entrées-sorties. Dans le cas des systèmes complexes, les deux types de modèles peuvent être combinés.

Dans ce chapitre, il est question de modéliser et simuler le comportement réel et dynamique d'un système éolien à vitesse variable et à pas fixe de calage des pales, basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA), en vue du diagnostic des défauts.

La modélisation mathématique de toute la chaîne de conversion d'énergie éolienne constitue une étape préliminaire importante, permettant de simuler le fonctionnement réel du système étudié. Le modèle développé fournit à cet effet des signaux pouvant être exploités pour l'élaboration des techniques de diagnostic de défauts de la MADA, à base de filtres de Kalman. On décrit dans un premier temps le système éolien et toutes les parties qui le constituent, la deuxième partie est consacrée à la modélisation par des équations mathématiques du système de conversion éolienne et de sa stratégie de commande MPPT. La troisième partie est sur la modélisation mathématique de la MADA et de sa commande vectorielle à flux statorique orienté. Finalement, la quatrième partie est destinée à présenter les résultats de simulation de l'ensemble du système à l'aide du logiciel MATLAB & Simulink.

II.2 Description du système éolien

De nos jours, la technologie des éoliennes à vitesse variable, basées sur une machine asynchrone à double alimentation est la plus rencontrée dans les parcs éoliens terrestres car elles peuvent produire de 8 à 15 % plus d'énergie que les éoliennes à vitesse fixe, caractérisées par un rendement considérablement limité [Ranganathan 2002]. Ce type de technologie est avantageux car il permet d'optimiser la puissance délivrée en fonction du vent qui souffle, par le réglage de la vitesse de rotation de l'éolienne. Dans ce cas, le générateur à vitesse variable, permet de fonctionner à une fréquence aussi fixe que possible sur une large gamme de vents et donc de récupérer un maximum de puissance pour chaque vitesse du vent, ce concept est appelé "Suivi du point de puissance maximale", son acronyme anglo-saxon est "Maximum Power Point Tracking MPPT" [Aimani 2004]. Ces turbines sont caractérisées par une intégration meilleure dans le réseau

électrique ainsi que par un bruit et nuisances sonores réduits lors d'un fonctionnement à faible vitesse du vent [Dubois 2009], [Attoui 2015].

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons donc choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné, plus connue sous l'appellation de Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une MADA, est composé des éléments suivants, à savoir : la turbine entraînant la MADA par l'intermédiaire d'un multiplicateur ou une boîte de vitesse. La MADA est raccordée directement par son stator au réseau électrique mais également par son rotor à travers deux convertisseurs statiques triphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Ces Convertisseurs, sont : le convertisseur côté MADA noté (CCM) et coté Réseau noté (CCR), sont commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). L'architecture de l'ensemble du système éolien étudié est présentée par la figure II.1.

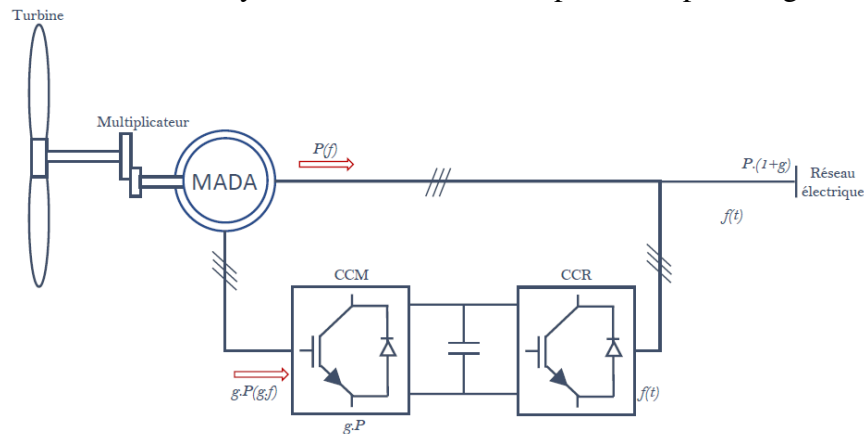


Figure II.1 Architecture d'une éolienne à vitesse variable basée sur une MADA

Le principe de fonctionnement de cette structure peut être décrit comme suit : Sous l'effet du vent, l'hélice ou appelée aussi rotor, se met en marche et ses pales tournent. L'hélice entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre lent, relié au multiplicateur. Ce dernier fait augmenter la vitesse lente de rotation de la turbine pour l'adapter à la vitesse de rotation du rotor de la génératrice qui est de l'ordre de 1500 (tr/min). La génératrice est reliée au multiplicateur par le moyen d'un axe, dit arbre rapide. L'énergie électrique est produite par la génératrice.

En partant de l'hypothèse que les pertes sont négligeables, le stator de la génératrice reçoit la puissance P générée par la rotation de la turbine et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie est sous forme de puissance mécanique, quantifiée à : $[(1-g) \times P]$; la quantité restante ($g \times P$) de la puissance est délivrée par les balais de la génératrice sous forme des grandeurs alternatives de fréquence ($g \times f$), d'où f est la fréquence du réseau électrique. Ces dernières ayant une fréquence variable, sont transformées en grandeurs satisfaisant les conditions du réseau électrique où elles sont injectées par l'intermédiaire du convertisseur électronique coté réseau (CCR). Par conséquent, Le réseau électrique est alimenté avec une puissance électrique quantifiée magnétique tournant à vitesse fixe, appelée vitesse de synchronisme, apparaît au stator. Ce flux

dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage statorique et donc du courant statorique. Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (*f.e.m*) dans le bobinage du rotor. La pulsation au stator étant constante car elle imposée par le réseau, nous pouvons donc régler la vitesse de la génératrice en agissant sur la puissance transmise au réseau à travers le glissement, g qui est donné par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad \text{II.1}$$

Avec : ω_s et ω sont respectivement les pulsations du stator et du rotor de la génératrice asynchrone doublement alimentée, en [rad/s].

L'avantage principal de cette structure réside dans le fait que le convertisseur côté MADA (*CCM*) et le convertisseur côté réseau (*CCR*) ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA. En effet, pour un glissement de $\pm 30\%$, seulement 25 % au maximum de la puissance nominale de la machine, transite par le rotor. Les convertisseurs sont donc dimensionnés pour une puissance comprise entre 25 et 30% de la puissance nominale de la machine et la variation de la vitesse de rotation de la machine est de 30% autour de la vitesse du synchronisme [Multon 2004]. Cette topologie permet aussi de fonctionnement en mode hyposynchrone et hypersynchrone grâce à la bidirectionnalité des convertisseurs [Müller 2002]. Le fonctionnement en mode hypersynchrone permet de délivrer de l'énergie électrique au réseau électrique à travers le stator et le rotor ce qui engendre un rendement élevé de l'éolienne [Ranganathan 2002]. La maintenance du multiplicateur de vitesse et du système bagues-balais de la MADA engendre un surcoût qui est compensé par l'économie faite lors du dimensionnement des convertisseurs, ce qui confère un avantage à cette structure en la comparant à d'autres structures pour lesquelles les convertisseurs sont dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine [Gaillard 2010], [Djeriri 2015].

II.3 Modélisation et commande du système éolien

II.3.1 Modélisation de la turbine éolienne

Considérons une turbine éolienne équipée de trois pales de longueur R , montées sur un arbre tournant à la vitesse lente de la turbine et entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation par le moyen d'un multiplicateur de vitesse ayant un gain noté G . La figure II.2 présente le schéma de la turbine éolienne étudiée.

Pour limiter la puissance produite par la génératrice à sa valeur nominale, la quasi-totalité des éoliennes utilisent deux types de contrôle aérodynamique : un système d'orientation des pales, destiné aux éoliennes à vitesse variable de puissance élevée ; il permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance constante. L'autre système, est un système à décrochage aérodynamique, conçu pour les éoliennes de petites puissances à vitesse fixe, il

consiste à concevoir la forme des pales de manière à augmenter les pertes de portance au-delà d'une certaine vitesse du vent.

Le système d'orientation des pales permet de limiter la puissance produite. À l'aide de ce système, la pale est orientée par un dispositif de commande appelé en anglais « Pitch control ».

Généralement, l'angle d'attaque β peut-être fixe ou variable. Dans cette étude, nous avons choisi que l'angle de calage des pâles soit maintenu à une valeur fixe correspondant au point de conversion optimale de l'énergie éolienne et les pâles de la turbine sont figées dans une même direction face au vent.

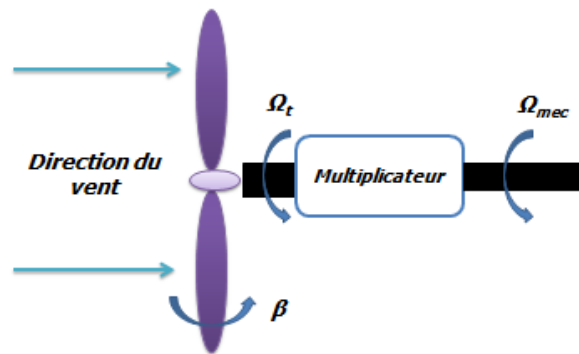


Figure II.2 Schéma de la turbine éolienne

II.3.1.1 Modélisation du vent

Le vent représente une composante vitale dans un système éolien et également déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité car dans les conditions optimales, la puissance captée par l'éolienne évolue, au cubique, avec la vitesse du vent. Cette composante est définie comme étant une masse d'air en mouvement et l'énergie cinétique du vent est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \text{II.2}$$

Où m est la masse d'air en mouvement [g] ; v est la vitesse de déplacement d'air [m/s].

La puissance du vent durant Δt [s] en fonction de l'énergie s'exprime selon :

$$P_{vent} = \frac{E}{\Delta t} \quad \text{II.3}$$

La caractérisation du vent nécessite la connaissance des quatre éléments suivants :

- Son profil directionnel, i.e. les tendances probabilistes de direction du vent, la répartition des vitesses de vent selon ces directions, la répartition des énergies selon ces directions ;
- Son profil de vitesse, c'est-à-dire les tendances probabilistes de vitesse, la loi de répartition de probabilité de ces vitesses, la vitesse la plus souvent rencontrée, le créneau des vitesses les plus

souvent rencontrées, les vitesses extrêmes et les vitesses de rafale, etc. ; les variations annuelles et journalières (horaires) des vitesses moyennes ;

-Son profil énergétique, qui découle du profil de vitesse [Dubois 2009]. Pour générer le profil de la vitesse du vent, il existe dans la littérature deux méthodes : soient les méthodes basées sur la mesure physique, soit la méthode de modélisation analytique à partir d'un modèle mathématique. La méthode physique consiste à mesurer chaque variable durant au minimum un cycle. Les données sont enregistrées, sélectionnées, filtrées de leurs erreurs, concaténées et enfin analysées pour en déduire les caractéristiques voulues. Celles-ci sont ensuite modélisées statistiquement et corrélées avec des sources extérieures en vue des prévisions à long terme. Aujourd'hui, pour mesurer l'ensemble des données utiles, on dispose de plusieurs types d'outils : girouettes, anémomètres, thermomètre, baromètre, hygromètre installés sur les mats des éoliennes ; les Sodars, qui sont des radars à effet Doppler sur les longueurs d'ondes sonores et les Lidars, qui sont des radars à effet Doppler sur les longueurs d'ondes de la lumière laser [Dubois 2009]. Cette première technique est beaucoup plus précise que la deuxième solution mais elle ne permet pas de simuler plusieurs types de profil de vitesse du vent. En effet, le profil de la vitesse du vent obtenu sera propre à un site donné. La deuxième technique semble plus souple car il s'agit d'une modélisation analytique de la vitesse du vent.

La vitesse du vent V est généralement représentée par une fonction scalaire évoluant dans le temps, donnée par : $V = f(t)$. En un point donné, elle peut aussi être décomposée en deux composantes : une moyenne variant lentement V_0 dénommée « composante lente » et une composante aléatoire appelée « la composante de turbulence », notée V_t , elle modélise les turbulences. Donc, la vitesse du vent peut s'écrire alors:

$$V(t) = V_0 + V_t(t) \quad \text{II.4}$$

Pour la vitesse du vent moyenne V_0 , il existe trois niveaux de vent :

- Le vent faible pour : $6 \text{ m/s} < V_0 < 12 \text{ m/s}$
- Le vent moyen pour : $12 \text{ m/s} < V_0 < 18 \text{ m/s}$
- Le vent fort pour : $V_0 > 18 \text{ m/s}$

La composante de turbulence est traitée statistiquement et l'écart type décrivant la variabilité du vent est défini comme suit :

$$\sigma_v = \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} V(t)^2 dt \quad \text{II.5}$$

Pour modéliser mathématiquement le profil de la vitesse du vent, la littérature offre trois techniques de le faire :

-Soit par filtrage du bruit blanc, dans lequel l'impact de la composante de turbulence est corrigé par l'emploi d'un filtre passe-bas ayant la fonction de transfert suivante [Boukhamkham 2011] :

$$F(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad \text{II.6}$$

Où : τ est la constante de temps du filtre, elle dépend du diamètre du rotor, de l'intensité de la turbulence du vent et de la vitesse moyenne du vent. Le schéma suivant montre la méthode de reconstruction du profil du vent :

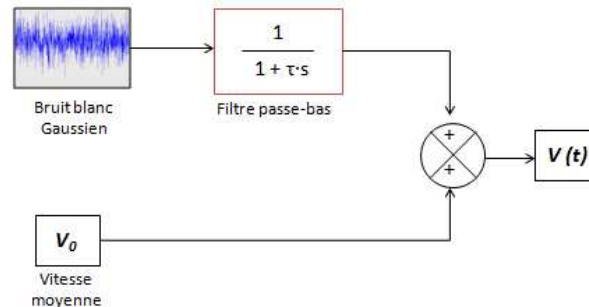


Figure II.3 Schéma de reconstruction du profil du vent par le filtrage du bruit blanc

La deuxième méthode de génération du profil de la vitesse du vent est celle qui décrit les variations du vent à l'aide de la densité spectrale, établie par le météorologue *I. Van der Hoven*. Dans ce modèle, la composante de turbulence est considérée comme un processus aléatoire stationnaire et donc elle ne dépend pas de la variation de la moyenne de la vitesse du vent [Poitiers 2003], [Camblong 2003], [Ameziane 2009], [Azzouz 2015]. La variation de la vitesse du vent $v(t)$ est donc écrite sous forme de la somme des harmoniques correspondant à chaque pulsation ω_i avec une phase φ_i déterminée de façon aléatoire :

$$V_v(t) = A + \sum_{i=1}^n a_k \cdot \sin(\omega_k \cdot t) \quad \text{II.7}$$

Où :

A est la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k est l'amplitude de l'harmonique d'ordre k

ω_k est la pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i est le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

La troisième méthode est celle de distribution de Weibull, où le potentiel éolien d'un site donné est obtenu par la mesure de la vitesse moyenne du vent dans des intervalles de temps réguliers. Ensuite, les données obtenues sont réparties en effectifs par classes de vitesse de vent par un

histogramme [Tameghe 2012]. Le profil du vent sur une période de temps désirée, respectant la distribution de Weibull, est donné par :

$$V_v(t) = (1 + \xi_v(t) - \xi_v) \cdot V_v \quad \text{II.8}$$

Où :

V_v est la valeur moyenne de la vitesse du vent, ξ_v est la valeur moyenne des perturbations est exprimée par :

$$\xi_v(t) = \left(-\frac{\ln(\text{rand}(t))}{c_v} \right)^{\frac{1}{k_v}} \quad \text{II.9}$$

Où : $\text{rand}(t)$ est une fonction génératrice de nombres aléatoires compris entre 0 et 1, suivant une distribution uniforme.

(C_v, k_v) est un couple de paramètres déterminés par l'analyse de l'histogramme des classes de vent. C_v est un facteur d'échelle généralement supérieur à 5. Le facteur de forme k_v est supérieur à 3 si la forme de l'histogramme ressemble à celle d'une distribution normale, caractérisée par une répartition uniforme autour d'une valeur moyenne.

II.3.1.2 Modélisation aérodynamique

La turbine ou l'hélice est la partie de l'éolienne qui est face au vent, elle comporte généralement trois pales de longueur R , montées sur un rotor. La turbine permet de capter l'énergie cinétique du vent et de la transformer en énergie mécanique récupérée sur l'arbre rotatif lent.

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad \text{II.10}$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'exprime comme suit :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{vent} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad \text{II.11}$$

Le couple aérodynamique C_{aero} est donné par l'expression suivante :

$$C_{aer} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{II.12}$$

Où :

Ω_t est la vitesse angulaire de rotation de la turbine [rad/s],

ρ est la densité de l'air, $\rho = 1.225$ [kg/m³],

$S = \pi \cdot R^2$ est la surface balayée par les pales d'une éolienne [m²],

R est la longueur de la pale jusqu'au centre du moyeu [m],

v est la vitesse du vent en amont du rotor de l'éolienne [m/s],

λ est le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne, c'est un paramètre de base sans unité, lié à la conception de chaque éolienne. Il représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et celle du vent au niveau de l'axe du rotor. λ est exprimé ainsi:

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad \text{II.13}$$

Ce paramètre dépend du nombre des pales de l'éolienne. En effet, si le nombre des pales est réduit, la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne est élevée et un maximum de puissance est extrait du vent. Pour le cas des éoliennes à pales multiples (*Western Wind Turbines*), le rapport de vitesse est égal à 1 ; pour les éoliennes ayant une seule pale, λ est d'environ 11. Quant aux éoliennes tripales, comme dans notre étude, elles ont un rapport de vitesse de 6 à 7. Pour les éoliennes de type Savonius, leur rapport de vitesse est inférieur à 1 [Renac 2018].

En vue de déterminer d'autres critères de variation de ce coefficient, des études ont été menées sur plusieurs types d'éoliennes et ont abouti aux résultats montrés sur les schémas suivants [Dubois 2009]:

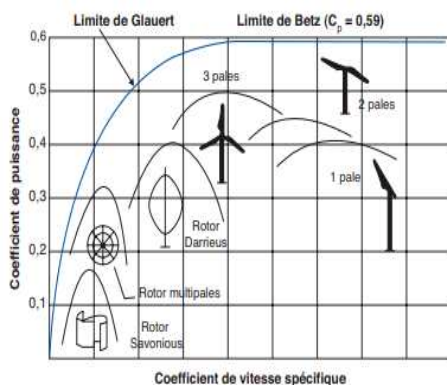


Figure II.4 Les courbes des coefficients de puissance selon le type de machine et selon leur coefficient de vitesse spécifique λ

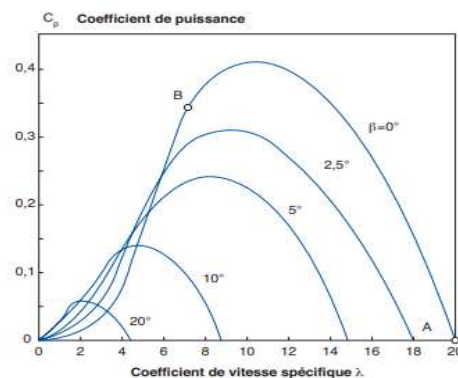


Figure II.5 Les courbes des coefficients de puissance selon l'angle de calage des pales β et selon le facteur de vitesse spécifique λ

La figure II.4 montre la raison de prédominance actuelle des éoliennes tripales ; ce type d'éoliennes offre un coefficient de puissance C_p meilleur par rapport aux autres types technologiques. La figure II.5 montre qu'en diminuant l'angle de calage des pales β , nous obtenons un coefficient de puissance important, le plus proche possible de la limite théorique (*Limite de Betz*) et par conséquent, la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne est élevée.

C_p est le coefficient de puissance ou d'efficacité de transfert aérodynamique qui varie avec la vitesse d'entrée. Ce coefficient n'a pas d'unité, il dépend essentiellement de l'aérodynamique des pales, du ratio de vitesse λ et de l'angle d'orientation des pales β . La *loi de Betz* a déterminé une limite théorique maximale du coefficient de puissance $C_{pmax} = 16/27 \sim 0,59$. En tenant compte des pertes, les éoliennes ne fonctionnent jamais à cette limite maximale et les aérogénérateurs les plus performants possèdent un C_p compris entre 0,35 et 0,45. Généralement, C_p est spécifique à chaque éolienne et son expression est donnée par le fabricant de l'éolienne ou à l'aide des formules non-linéaires. Pour calculer le coefficient C_p , différentes approximations numériques ont été proposées dans la littérature. Les expressions de C_p fréquemment rencontrées dans la littérature sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II.1 Différentes formules numériques du coefficient C_p

Type du Coefficient de puissance C_p	Expression
	$0,22 \cdot \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right] \cdot e^{\frac{12,5}{\lambda_i}}$ avec $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$ [Aguglia et al. 2010], [Kendouli 2011]
	$0,5 \cdot \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right] \cdot e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0,068 \cdot \lambda$ [Ackermann 2005], [Mirecki 2005], [Davigny 2007] Avec: $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$
	$0,5176 \cdot \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right] \cdot e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0,0068 \cdot \lambda$ [Attoui 2015] Avec: $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$
	$0,5109 \cdot \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right] \cdot e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0,0068 \cdot \lambda$ [Sylla 2013], [Nesmat 2008] Avec: $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$
	$0,44 \cdot \left[\frac{125}{\lambda_i} - 6,94 \right] \cdot e^{-\frac{16,5}{\lambda_i}}$ [Tameghe 2012] Avec: $\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + 0,002}$

Sinusoïdale	$0,5 - 0,167 \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda - 3)}{18,9 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2)$ [Aimani 2004]
	$0,3 - 0,00167 \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{10 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot \beta$ [Hacil 2012]
Polynomiale	$6 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^5 + 10^{-5} \cdot \lambda^4 - 65 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^2 + 76 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda + 0,007$ [Krafczyk 2013]
	$7,95633 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^3 - 9,4 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda + 0,001$ [Poitiers 2003]
	$\sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 \alpha_{ij} \cdot \beta^i \cdot \lambda^j$ avec: $2 < \lambda < 13$

Notre objectif étant de modéliser une éolienne à turbine tripale d'une puissance nominale de 3 kW, nous avons utilisé les paramètres de la turbine éolienne et de la MADA, présentés dans les travaux de P. Krafczyk [Krafczyk 2013]. De ce fait, l'expression du C_p , utilisée dans notre étude, est une équation polynomiale présentant une valeur maximale du coefficient de puissance ($C_{pmax} = 0.35$) et une valeur optimale de vitesse relative ($\lambda = 7$). Le coefficient de puissance C_p est donné par l'équation suivante :

$$C_p(\lambda) = 6 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda^5 + 10^{-5} \cdot \lambda^4 - 65 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^2 + 76 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda + 0.007 \quad \text{II.14}$$

Le schéma bloc présentant la partie aérodynamique est le suivant :

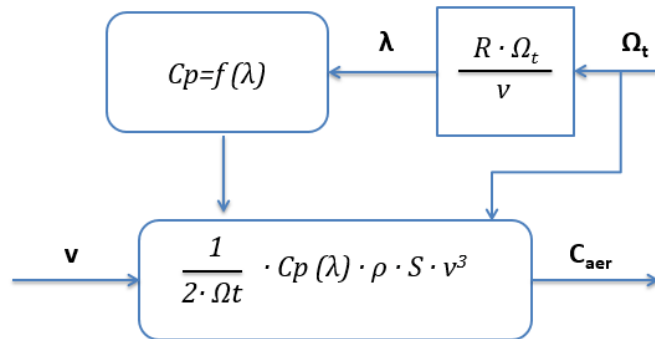


Figure II.6 Schéma bloc de la partie aérodynamique

II.3.1.3 Modélisation de la partie mécanique :

La partie mécanique de l'éolienne est constituée de l'arbre principal tournant à vitesse lente de la turbine Ω_t , du multiplicateur de gain G entraînant la génératrice à une vitesse Ω_g par l'intermédiaire d'un arbre d'entraînement secondaire rapide.

a. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur ou aussi appelé boîte de vitesses est un dispositif permettant comme son nom l'indique de multiplier la vitesse assez lente de la turbine Ω_t par un simple gain de multiplication G en vue de la faire adapter à la vitesse rapide de rotation de la génératrice Ω_g . Ce multiplicateur est considéré comme étant idéal, en effet, l'élasticité, les frottements et les pertes énergétiques du multiplicateur sont considérés négligeables. Les deux équations modélisant mathématiquement le fonctionnement de ce dispositif sont données comme suit :

$$\begin{cases} C_g = \frac{C_{aer}}{G} \\ \Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \end{cases} \quad \text{II.15}$$

Où :

C_g est le couple récupéré en sortie du multiplicateur et appliqué sur l'arbre de la génératrice [N·m],

C_{aer} est le couple aérodynamique de la turbine éolienne [N·m],

Ω_g est la vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice [rad·s⁻¹],

Ω_t est la vitesse de rotation de la turbine [rad·s⁻¹],

G est le rapport de multiplication (sans unité) ; $G = N_1/N_2$

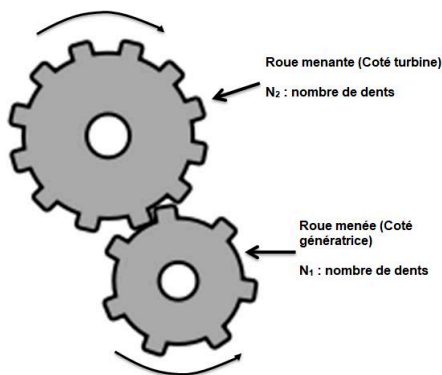


Figure II.7 Modèle du multiplicateur

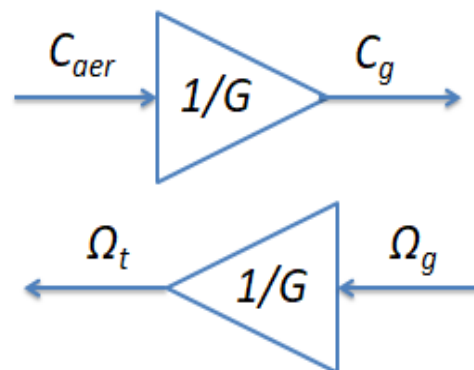


Figure II.8 Schéma bloc du multiplicateur

La figure II.7 montre le schéma des engrenages pour la détermination du rapport de multiplication et la figure II.8 présente le schéma bloc du multiplicateur de vitesse.

b. Modèle de l'arbre mécanique

Dans ce modèle, nous considérons deux masses : une masse correspondant à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales ; elle comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. L'inertie de la turbine est ramenée au rotor de la génératrice et notée J_t . La deuxième masse représente l'inertie du rotor de la génératrice et notée J_g .

L'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine (pales & moyeu de l'éolienne) ramenée au rotor de la génératrice et de l'inertie du rotor de la génératrice, peut-être écrite selon les équations suivantes :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \text{ [Aimani 2004], [Gaillard 2010]} \quad \text{II.16}$$

$$J = J_t \cdot G^2 + J_g \text{ [Ackermann 2005], [Hacil 2012]} \quad \text{II.17}$$

$$J = J_t + J_g \sim J_t \text{ [Ghennam 2011]} \quad \text{II.18}$$

De même pour le coefficient de frottement visqueux total f_v , il est constitué du coefficient de frottement associé à la génératrice f_g et du coefficient de frottement visqueux de la turbine f_t . Le coefficient f_v peut être exprimé comme suit:

$$f_v = \frac{f_t}{G^2} + f_g \quad \text{II.19}$$

Donc, la partie mécanique peut être modélisée selon le schéma montré sur la figure suivante [Gaillard 2010], [Ghennam 2011] :

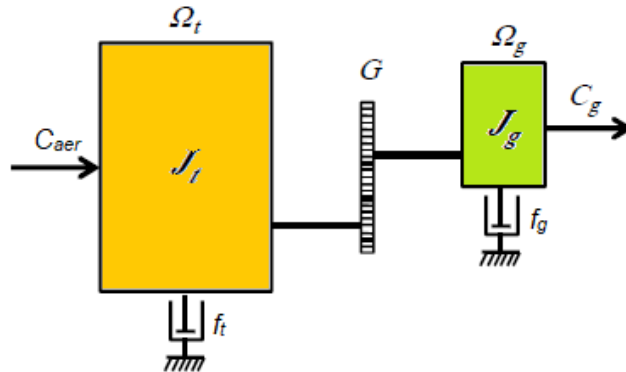


Figure II.9 Modèle de la partie mécanique de l'éolienne

La vitesse mécanique de la génératrice Ω_g , dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice C_{mec} (II.20). Ce couple est la résultante du couple électromagnétique de la génératrice C_{em} , du couple de frottement visqueux C_v et du couple du multiplicateur de vitesse C_g . (II.21).

$$C_{mec} = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} \quad \text{II.20}$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_v \quad \text{II.21}$$

Le couple du frottement visqueux C_v est modélisé ainsi :

$$C_v = f \cdot \Omega_g \quad \text{II.22}$$

Donc, à partir de ces équations établies, nous obtenons l'équation différentielle de la dynamique de la partie mécanique de l'éolienne, exprimée par :

$$J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad \text{II.23}$$

Le schéma bloc de la partie mécanique de l'éolienne est présenté par la figure suivante :

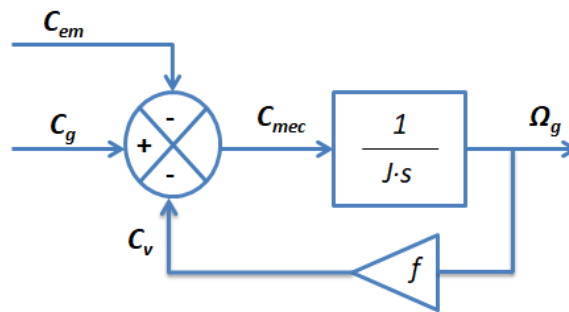


Figure II.10 Schéma bloc de la partie mécanique de l'éolienne

Le schéma bloc de l'ensemble de la turbine éolienne est donné par :

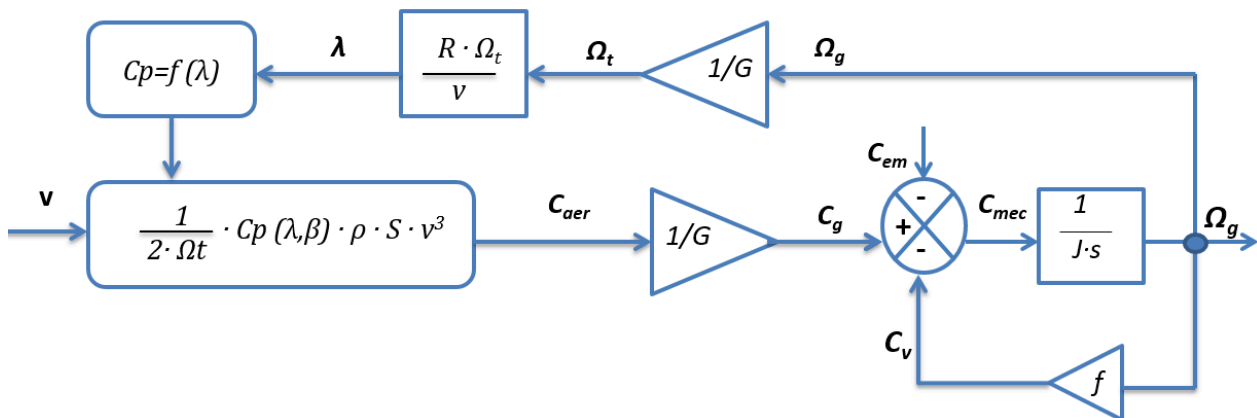


Figure II.11 Schéma bloc de l'ensemble de la turbine éolienne

Dans le but d'atteindre en permanence le point maximal de puissance fournie par une turbine éolienne fonctionnant à vitesse variable et sur un large intervalle de la vitesse du vent, la technique de contrôle M.P.P.T (*Maximum Power Point Tracking*) est utilisée. Cette méthode consiste à produire une puissance maximale en agissant sur le coefficient de puissance C_p . Ce dernier étant dépendant de la vitesse de la turbine, il est par conséquent primordial de mettre en place des

stratégies de commande permettant de régler la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent, l'entrée perturbatrice du système éolien et facteur de variation de la puissance produite. Dans le paragraphe suivant, la stratégie de commande M.P.P.T et les deux types de cette technique, existantes dans la littérature, seront présentées.

II.4 Extraction du maximum de puissance du vent M.P.P.T

Pour extraire le maximum de puissance lors de son fonctionnement, la turbine d'une éolienne à vitesse variable est munie d'un système de commande connue sous le nom de «Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T)». Cette stratégie est aussi utilisée pour la recherche du point maximum dans la courbe courant-tension des systèmes photovoltaïques [Tafticht 2006], [Yu et al. 2004], [Ansari et al. 2009]. Pour les éoliennes, nous pouvons distinguer deux types de stratégies M.P.P.T possibles [Gaillard 2010], [Bechouche 2013], [Ghennam 2011] :

Le premier type considère que la caractéristique C_p n'est pas connue, celui-ci est moins utilisé ; tandis que la deuxième stratégie considère que la caractéristique C_p est connue et celle-ci est la plus répandue actuellement. Sous ce deuxième type, nous pouvons distinguer entre deux modes de contrôle [Aimani 2004] :

- ✓ Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation,
- ✓ Le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

II.4.1 Contrôle M.P.P.T avec asservissement de la vitesse

Cette méthode consiste à maintenir à tout instant le couple électromagnétique C_{em} développé par la génératrice, égal à sa valeur de référence C_{em}^* . Cela revient à fixer la vitesse de rotation de la génératrice Ω_g à une vitesse de référence Ω_g^* et par conséquent un régulateur de vitesse de type Proportionnel Intégral (PI) est utilisé.

Le schéma bloc montrant le contrôle M.P.P.T avec l'asservissement de la vitesse de rotation est présenté dans la figure suivante :

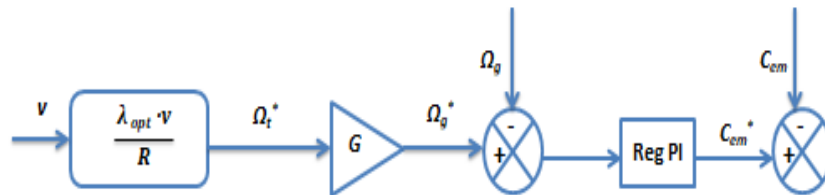


Figure II.12 Schéma bloc de la stratégie M.P.P.T

Avec : λ_{opt} est la valeur optimale de la vitesse relative pour un angle de calage β fixe.

Cette technique exige la mesure locale de la vitesse du vent à l'aide d'un anémomètre, tandis que cette mesure locale de vitesse de vent ne représente pas la valeur moyenne de la vitesse du vent

présente sur la périphérie des pales. En plus, une mesure erronée de la vitesse du vent entraîne la dégradation de la puissance captée par la turbine éolienne [Gaillard 2010]. Tenant compte de ces raisons, les turbines éoliennes sont contrôlées dans la plupart du temps par une technique *M.P.P.T* sans asservissement de la vitesse mécanique. Cette dernière est le mode de contrôle adopté dans cette étude.

II.4.2 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse

Cette deuxième stratégie de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien. Donc, l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine est donnée par :

$$C_g - C_{em} - C_{vis} = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} = 0 \quad \text{II.24}$$

En négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} = 0$), nous avons :

$$C_g = C_{em} \quad \text{II.25}$$

La vitesse de rotation de la turbine est estimée à partir de la mesure de la vitesse mécanique de la génératrice Ω_g . La valeur estimée de la vitesse de rotation de la turbine est notée Ω_{t-est} et donnée par :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_g}{G} \quad \text{II.26}$$

En raison de difficulté de mesure de la vitesse du vent, elle est donc estimée à partir de l'estimation de la vitesse de rotation de la turbine comme suit :

$$v_{est} = \frac{\Omega_{t-est} \cdot R}{\lambda} \quad \text{II.27}$$

Ensuite, le couple estimé de la turbine éolienne $C_{aer-est}$ est calculé à partir des valeurs estimées de la vitesse du vent v_{est} et de la vitesse de rotation de la turbine Ω_{t-est} . Ce couple peut s'exprimer ainsi:

$$C_{aer-est} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2 \cdot \Omega_{t-est}} \quad \text{II.28}$$

Nous pouvons donc déduire le couple électromagnétique de référence comme suit :

$$C_{em}^* = \frac{C_{aer-est}}{G} \quad \text{II.29}$$

Au point maximum de puissance, la vitesse relative est égale à sa valeur optimale λ_{opt} et le coefficient de puissance est égal à sa valeur maximale C_{pmax} , alors le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em}^* = C_{pmax} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_g^2}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \quad \text{II.30}$$

Pour simplification, nous posons :

$$K = C_{pmax} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \quad \text{II.31}$$

Alors :

$$C_{em}^* = K \cdot \Omega_g^2 \quad \text{II.32}$$

Nous constatons que le couple électromagnétique de référence est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la génératrice Ω_g . Le schéma bloc présentant la stratégie de contrôle *M.P.P.T* sans l'asservissement de la vitesse de rotation est donné ci-dessous :

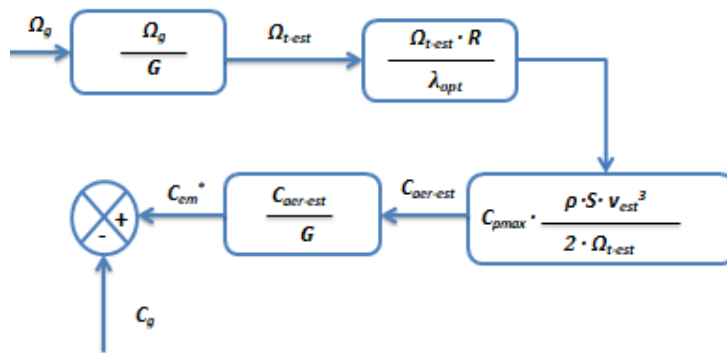


Figure II.13 Schéma bloc de la commande M.P.P.T sans asservissement de la vitesse mécanique

II.5 Modélisation et commande de la MADA

II.5.1 Constitution de la MADA

La machine asynchrone doublement alimentée (MADA) est une machine asynchrone triphasée. Sa double alimentation est expliquée par le fait qu'elle est alimentée par ses deux armatures à la fois : son stator et son rotor. Son avantage principal est qu'elle offre la possibilité de contrôle du flux des puissances pour les régimes hypo et hypersynchrone, soit dans le fonctionnement moteur ou générateur. Elle permet aussi un fonctionnement à vitesse variable du système où elle est intégrée [Djeriri 2015].

Pour l'utilisation dans un système éolien à vitesse variable, il existe deux grandes configurations pour la double alimentation de la machine asynchrone : la double alimentation par le stator et la double alimentation par le stator et le rotor. Cette dernière configuration est caractérisée par l'utilisation des convertisseurs, installés entre le rotor de la machine et le réseau, de taille et de coût réduits du fait qu'ils font transiter une puissance rotorique diminuée. Aussi, elle offre la possibilité de régler l'amplitude et la fréquence des tensions rotoriques. Ce sont les raisons pour lesquelles, cette configuration est favorisée dans les systèmes éoliens à vitesse variable en comparaison avec des éoliennes à vitesse variable alimentées par le stator avec des convertisseurs

de puissance [Aimani 2004]. Dans la littérature, nous trouvons différents types de la MADA selon sa conception [Dendouga 2010], [Khojet El Khil 2006], [Salloum 2007], [Vidal 2004] :

✚ **Machine asynchrone doublement alimentée à rotor bobiné :**

La MADA à rotor bobiné est une machine asynchrone possédant un stator identique à celui des machines triphasées à induction et ayant un rotor constitué de trois enroulements triphasés, connectés en étoile et leurs extrémités reliées chacune à des bagues conductrices. Ces connexions permettent le contrôle-commande des grandeurs rotoriques [Robyns 2010]. La figure suivante montre la constitution et la disposition des enroulements statoriques et rotoriques d'une MADA à rotor bobiné.

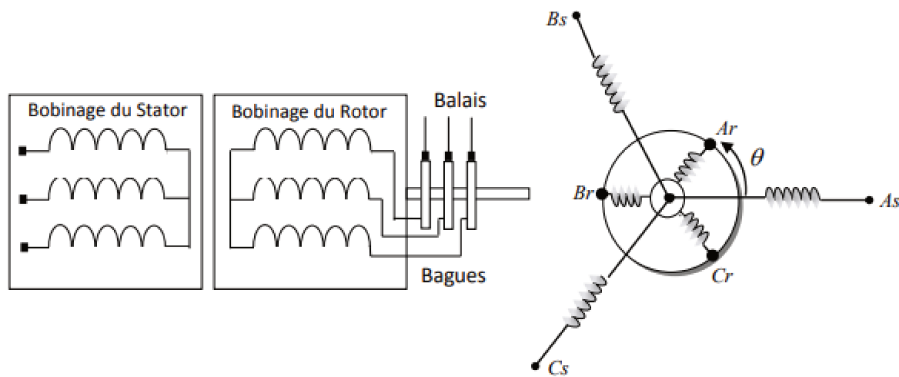


Figure II.14 Schéma descriptif d'une MADA

Lorsqu'elle est connectée au réseau, son stator est directement relié au réseau électrique tandis que son circuit rotorique est connecté au réseau par le moyen d'un seul convertisseur direct (AC/AC) : Cyclo-convertisseur ou Convertisseur matriciel [Dendouga 2010] ou par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance, à noter l'un se trouve du côté de la machine (CCM) et l'autre du côté du réseau électrique (CCR). Dans la littérature, il existe plusieurs structures possibles : une MADA avec pont à diodes et pont à thyristors « **Structure de Kramer** », une MADA avec pont à diodes et pont à transistors, une MADA avec cyclo-convertisseur, une Structure à trois MLI et une MADA avec convertisseurs MLI, appelée « **Montage de Scherbius** » [Djeriri 2015]. Nous présentons ci-dessous la structure Kramer et la structure Scherbius avec convertisseurs MLI :

- **Structure de Kramer :**

Cette structure, appelée montage *Kramer*, utilise un pont à diodes et un pont à thyristors. Le dimensionnement des convertisseurs requiert une fraction de la puissance nominale de la machine et ceci entraîne moins d'encombrement puisque la taille de l'ensemble redresseur-onduleur est réduite. Aussi le glissement est égal à une valeur inférieure à 30% et la vitesse de la machine varie dans une plage de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme. Par ailleurs, les thyristors utilisés dans l'onduleur ont un mauvais effet sur le facteur de puissance du fait qu'ils injectent des harmoniques multiples de la fréquence du réseau, en plus l'unidirectionnalité du redresseur par l'emploi des diodes permet le transfert de l'énergie électrique dans un seul sens qui est du rotor

vers le réseau lors du fonctionnement hypersynchrone. La Figure II.15 présente la structure de *Kramer*, utilisée dans une éolienne à vitesse variable.

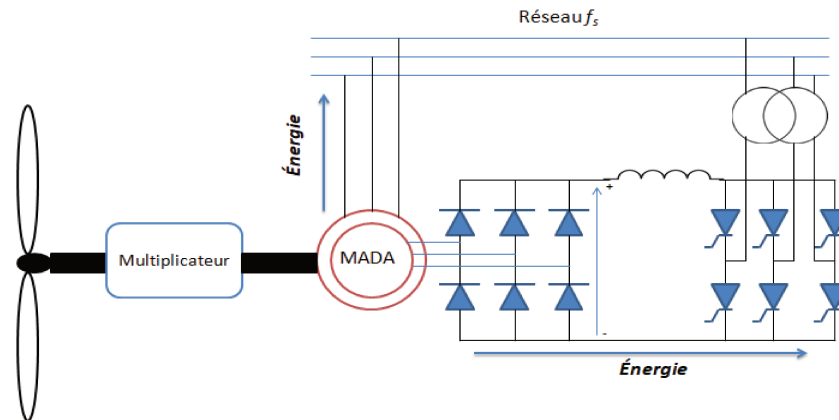


Figure II.15 Structure Kramer

- **Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) :**

C'est la structure la plus rencontrée dans un système éolien à vitesse variable. Elle est caractérisée par la bidirectionnalité des convertisseurs, ce qui permet au système un fonctionnement hypo et hypersynchrone et aussi le contrôle du coefficient de puissance [Poitiers 2003]. Lors du fonctionnement hypersynchrone, la puissance totale injectée dans le réseau dépasse la puissance nominale de la machine, en effet, le réseau reçoit de l'énergie via le stator et le rotor de la machine. Un troisième avantage est que le dimensionnement des convertisseurs représente un tiers de la puissance nominale de la machine et les pertes constituent uniquement 1% de cette puissance. Finalement, la commande MLI des convertisseurs fait circuler des courants de fréquence élevée dans les bobines du circuit rotorique [Ouyessaad 2014]. La figure II.16 montre la structure de Scherbius avec des convertisseurs commandés par MLI.

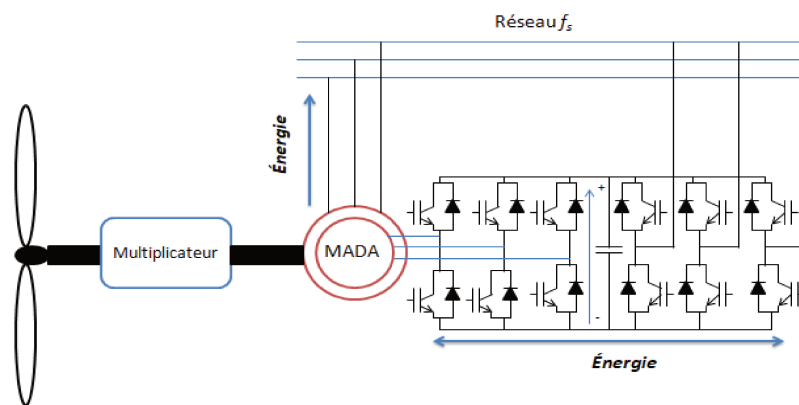


Figure II.16 Structure Scherbius avec convertisseurs MLI

✚ **Machine asynchrone à double alimentation en cascade asynchrone :**

Ce type de machine est composé de deux machines asynchrones possédant des rotors bobinés et ayant un accouplement mécanique et une liaison électrique entre elles. Le stator de la première machine est relié directement au réseau alors que le stator de la deuxième machine est connecté au réseau par le moyen d'un convertisseur du type (AC/AC). Cette configuration offre la possibilité de piloter le système entier via le stator alimenté par le convertisseur et également de commander de façon découplée les puissances active et réactive [Dendouga 2010].

✚ *Machine asynchrone à double alimentation cascadée à un repère :*

Cette machine est constituée de deux machines connectées entre elles mécaniquement seulement. Comme pour le type cité précédemment, le stator d'une machine est couplé directement au réseau alors que le stator de la deuxième machine est relié au réseau à travers un convertisseur (AC/AC).

✚ *Machine à double alimentation sans balais :*

Cette machine possède deux bobinages triphasés avec des nombres de paires de pôles différents au stator. Le premier bobinage, faisant transiter la puissance, est relié directement au réseau et le deuxième bobinage, permettant la variation des courants d'excitation de la machine, est connecté au réseau à travers un convertisseur AC/AC. Pour le rotor, il est constitué de boucles conductrices ayant un nombre de paires de pôles égal à la somme des deux nombres de paires de pôles des deux bobinages de stator. La machine à double alimentation à réluctance variable est un type de la MADA sans balais, la seule différence entre les deux machines réside dans la conception du rotor basée sur un entrefer variable ou sur le principe de réluctance variable.

Pour le système éolien faisant l'objet de cette étude, nous avons choisi une configuration basée sur une MADA à rotor bobiné avec un système bagues-balais selon une structure Scherbius avec convertisseurs MLI.

II.5.2 Principe de fonctionnement de la MADA

Lorsque le stator de la machine est alimenté par le réseau de fréquence f_s , un champ magnétique tournant B_s de vitesse N_s apparaît dans le circuit statorique, tel que : $N_s = \frac{f}{p}$

Si le rotor est supposé bloqué (en circuit-ouvert), ce champ produit balaye le rotor et crée des forces électromotrices dans les conducteurs selon la loi de Faraday : $e = \frac{d\varphi}{dt}$

La fermeture des circuits rotoriques engendrent l'apparition des courants rotoriques et par conséquent l'apparition des forces électromotrices résultant de l'action du champ statorique sur les courants rotoriques. Et selon la *loi de Lenz*, les forces entraînent en rotation le rotor suivant le même sens de rotation du champ magnétique. Lorsque le couple de démarrage est suffisant, le rotor commence à tourner.

Deux conditions essentielles pour générer un couple, qui sont : Un circuit rotorique fermé et la vitesse du rotor N soit différente de la vitesse de synchronisme N_s , car lorsque $N = N_s$ aucune force

électromotrice (*f.e.m*) n'est produite et aucun courant n'est induit dans le rotor et donc il n'y a pas de couple. Les courants rotoriques sont générés suite à la différence de vitesses N_s et N . D'où : N_s, N sont respectivement la vitesse de synchronisme et du rotor de la machine.

La fréquence des grandeurs rotoriques est proportionnelle au glissement selon l'équation suivante :

$$f_r = g \cdot f_s \quad \text{II.33}$$

Tenant compte de la grandeur du glissement, nous pouvons classier les modes de fonctionnements de la MADA en 4 régimes différents :

- **Régime stationnaire** : la magnétisation du stator est faite par le réseau avec une fréquence f_s et le champ magnétique produit donne naissance à une *f.e.m* au rotor de la machine mais aucun courant ne circule dans le circuit rotorique et par conséquent aucun couple n'est produit. Le comportement de la MADA est identique à celui d'un transformateur. Dans ce cas, nous avons : $\omega=0$ et $g=1$.
- **Régime hyposynchrone** : dans ce cas, la vitesse du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisme ω_s et le glissement est positif, ce qui signifie que le champ statorique tourne dans le même sens que le rotor de la machine. Lorsque la vitesse du rotor s'approche de celle de synchronisme, la fréquence f du rotor décroît graduellement et tend vers 0. Cette fois-ci, nous avons : $\omega < \omega_s$ et $0 < g < 1$.
- **Régime synchrone** : dans ce cas, la vitesse du rotor est égale à celle de synchronisme, donc il n'y a pas de glissement entre le champ statorique tournant et le rotor de la machine ($\omega = \omega_s$ et $g=1$). De ce fait, il n'y a aucune tension induite dans le bobinage rotorique.
- **Régime hypersynchrone** : dans ce régime, la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse de synchronisme et le glissement devient négatif. Ceci mène à une augmentation de la tension rotorique et nous avons donc : ($\omega > \omega_s$ et $g < 1$).

II.5.3 Modes de fonctionnement de la MADA :

Un avantage principal de la MADA réside dans le fait qu'elle permet un fonctionnement dans quatre quadrants différents, contrairement à la machine asynchrone classique qui autorise un fonctionnement en moteur lorsque la vitesse de son rotor est en dessous de la vitesse de synchronisme et fonctionne en génératrice dans le cas où sa vitesse de rotation dépasse la vitesse de synchronisme. Donc, pour une MADA, la vitesse de rotation n'impose plus le mode de fonctionnement en moteur ou en génératrice. Les quatre modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous :

-Fonctionnement moteur hyposynchrone de la MADA : lors de ce mode, le réseau fournit au stator de la MADA une puissance notée P_s , la puissance de glissement P_r est injectée dans le réseau en transitant par les deux convertisseurs et une puissance mécanique est récupérée sur le rotor de la machine.

-Fonctionnement moteur hypersynchrone de la MADA : dans ce mode, la puissance au stator P_s est fournie par le réseau. Aussi La puissance de glissement P_r est transférée du réseau vers le rotor de la MADA en transitant par les deux convertisseurs. Et la puissance mécanique P_m est récupérée sur l'arbre de la MADA.

-Fonctionnement génératrice hyposynchrone : la puissance mécanique P_m est fournie à la machine par la turbine dans le cas d'une éolienne, la puissance P_s fournit au réseau transite par le stator, la puissance de glissement P_r est absorbée par le rotor.

-Fonctionnement génératrice hypersynchrone : la puissance P_s et la puissance de glissement P_r sont injectées dans le réseau. Nous avons ainsi, un fonctionnement en mode génératrice au-dessus de la vitesse de synchronisme.

Pour le système éolien, les deux derniers modes de fonctionnement de la MADA sont les plus intéressants et le schéma suivant résume les quatre modes de fonctionnement de la MADA et les flux de puissances correspondants à chaque mode de fonctionnement :

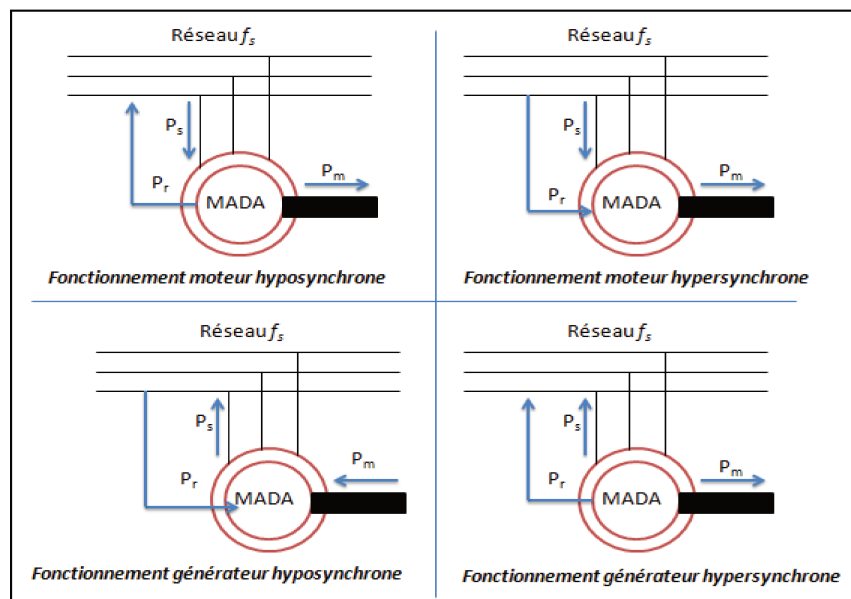


Figure II.17 Les quatre modes de fonctionnement de la MADA

II.5.4 Avantages de la MADA pour l'application éolienne :

- Un système éolien basé sur la MADA permet de faire varier la vitesse du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet, la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyposynchrone et hypersynchrone. C'est ainsi que nous parvenons à extraire le maximum de puissance possible. L'emploi des éoliennes à vitesse variable autorise le fonctionnement

sur une large plage de vitesses de vent et permet d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [Aimani 2004].

- Dans un système éolien, la vitesse de rotation de la MADA est de $\pm 30\%$ autour du synchronisme, cela limite la puissance circulant dans les enroulements rotoriques qui est égale à $(g \times P)$ et par conséquent les convertisseurs de puissance sont dimensionnés pour transférer une puissance de glissement P_r égale au maximum à 30% de la puissance nominale de la machine.
- Les convertisseurs de puissance sont de taille réduite d'environ 70%, ils ont un coût réduit et sont moins bruyants par rapport aux convertisseurs utilisés dans les systèmes éoliens à base de machines à cage d'écureuil ou à aimants permanents [Poitiers 2003]. Aussi, ces convertisseurs ont un taux de pertes diminué ce qui procure au système un rendement meilleur.
- L'utilisation de la MADA dans une éolienne à vitesse variable, autorise un contrôle de façon indépendante des puissances active et réactive via le convertisseur côté rotor de la machine (CCM) et par conséquent le contrôle du coefficient de puissance [Francois 2005], [Aimani 2004].

II.5.5 Modélisation mathématique et contrôle vectoriel de la MADA

II.5.5.1 Modèle triphasé de la MADA

La MADA considérée dans cette étude est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné, constituée d'un stator fixe et d'un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Le stator comporte trois enroulements semblables logés dans des encoches, ayant un nombre p de paires de pôles et ils sont écartés entre eux avec un angle électrique de $\frac{2 \cdot \pi}{3}$

Quant au rotor, il comporte aussi trois enroulements triphasés, connectés en étoile et dont les extrémités sont raccordées à un système bagues-balais.

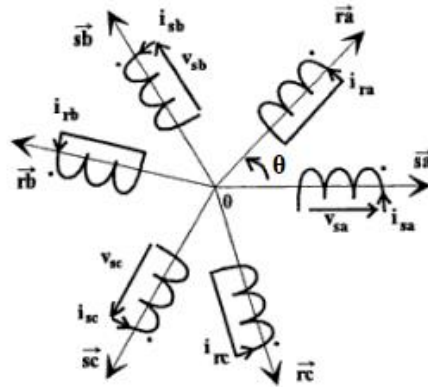


Figure II.18 Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique [Caron 1995]

Avec :

Les indices s, r désignent respectivement le stator et le rotor de la machine,

(\cdot) désigne le sens des courants et des flux ; en effet, un courant positif entre par le point crée un flux positif dans l'enroulement,

θ est l'angle électrique entre \vec{R}_a et \vec{S}_a

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} sont les tensions d'alimentation des phases statoriques S_a, S_b, S_c ,

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} sont les courants des phases statoriques S_a, S_b, S_c ,

v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} sont les tensions des phases rotoriques R_a, R_b, R_c ,

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} sont les courants des phases rotoriques R_a, R_b, R_c ,

La modélisation mathématique de cette machine, nécessite la mise au point de certaines hypothèses simplificatrices :

- Entrefer constant,
- Effet des encoches négligé,
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante,
- Pertes ferromagnétiques négligeables,
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux,
- La constante des inductances propres,
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

Les tensions statoriques sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \left(\frac{d}{dt}\right) \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.34}$$

Où:

$$[v_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) \cdot [\Phi_{sabc}] \quad \text{II.35}$$

Et pour les enroulements rotoriques, les tensions rotoriques triphasées s'écrivent comme suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \left(\frac{d}{dt}\right) \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.36}$$

Où :

$$[v_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) \cdot [\Phi_{rabc}] \quad \text{II.37}$$

Pour les équations qui lient les flux et les courants, nous avons :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad \text{II.38}$$

Où : $[L_s]$ et $[L_r]$ sont les matrices des inductances statoriques et rotoriques données en fonction des inductances propres et mutuelles, exprimées ainsi :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad \text{II.39}$$

Et:

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad \text{II.40}$$

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^T = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{II.41}$$

Avec :

R_s, l_s sont respectivement la résistance et l'inductance d'une phase statorique,

R_r, l_r sont respectivement la résistance et l'inductance d'une phase rotorique,

M_s, M_r sont respectivement le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statoriques et rotoriques,

M_{sr} est l'inductance mutuelle entre une phase de stator et une phase de rotor,

Alors, nous avons finalement :

$$[v_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + (d/dt) \cdot \{[L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}] \cdot [i_{rabc}]\} \quad \text{II.42}$$

$$[v_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + (d/dt) \cdot \{[M_{sr}]^t \cdot [i_{sabc}] + [L_r] \cdot [i_{rabc}]\} \quad \text{II.43}$$

II.5.5.2 Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park (d, q)

En vue d'obtenir une représentation mathématique plus simple de la machine, son modèle diphasé dans le repère de *Park* tournant noté (d, q) est présenté dans cette section ; ' d ' désigne l'axe direct du repère et ' q ' désigne son axe en quadrature.

La transformation de *Park* est un outil mathématique utilisé en Électrotechnique, qui permet de modéliser un système triphasé grâce à un modèle diphasé. Cet outil a été proposé pour la première fois par *Robert H. Park* en 1929. Le passage du repère triphasé vers un repère diphasé est obtenu par la multiplication des grandeurs de tensions, de courants et de flux par une matrice de transformation, définie par :

$$[X_{dq0}] = [p(\theta)] \cdot [X_{abc}] \quad \text{II.44}$$

D'où :

$[p(\theta)]$ est la matrice de transformation de *Park* donnée par :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.45}$$

Pour écrire les équations des tensions, des courants et des flux, aussi bien qu'au stator qu'au rotor de la machine, dans le repère de *Park* ; nous appliquons deux transformations de *Park* en remplaçant dans l'équation (II.45) l'angle θ par θ_s pour le stator et par θ_r pour le rotor et nous obtenons ainsi : $[p(\theta_s)]$ et $[p(\theta_r)]$. Avec, θ_s et θ_r sont les angles électriques montrés sur la figure suivante :

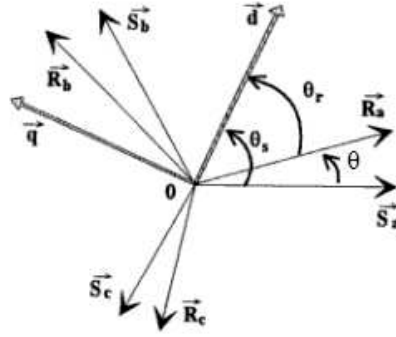


Figure II.19 Les angles du système dans l'espace électrique [Caron 1995]

Selon la figure, les angles θ_s et θ_r sont liés à l'angle θ par la relation suivante :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad \text{II.46}$$

Nous avons donc:

- Pour le stator :

$$[i_{dq0}]_s = [p(\theta_s)] \cdot [i_{abc}]_s \quad \text{II.47}$$

$$[v_{dq0}]_s = [p(\theta_s)] \cdot [v_{abc}]_s \quad \text{II.48}$$

$$[\Phi_{dq0}]_s = [p(\theta_s)] \cdot [\Phi_{abc}]_s \quad \text{II.49}$$

D'où :

$$[i_{dq0}]_s = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{0s}]^T ; [v_{dq0}]_s = [v_{ds} \quad v_{qs} \quad v_{0s}]^T ; [\Phi_{dq0}]_s = [\Phi_{ds} \quad \Phi_{qs} \quad \Phi_{0s}]^T$$

- Pour le rotor :

$$[i_{dq0}]_r = [p(\theta_r)] \cdot [i_{abc}]_r \quad \text{II.50}$$

$$[v_{dq0}]_r = [p(\theta_r)] \cdot [v_{abc}]_r \quad \text{II.51}$$

$$[\Phi_{dq0}]_r = [p(\theta_r)] \cdot [\Phi_{abc}]_r \quad \text{II.52}$$

D'où :

$$[i_{dq0}]_r = [i_{dr} \quad i_{qr} \quad i_{0r}]^T ; [v_{dq0}]_r = [v_{dr} \quad v_{qr} \quad v_{0r}]^T ; [\Phi_{dq0}]_r = [\Phi_{dr} \quad \Phi_{qr} \quad \Phi_{0r}]^T$$

Selon l'objectif de l'étude faite sur le système, il existe différentes orientations du repère diphasé (d, q) :

- Pour étudier les grandeurs statoriques, nous choisissons un repère tournant à la vitesse du rotor. De ce fait, $\theta_r=0$

- Pour étudier les grandeurs statoriques, le repère est choisi avec des axes liés au stator. Alors : $\theta_s=0$.
- Pour établir la commande du système, les axes du repère sont solidaires au champ tournant.

Aussi, la transformation de *Park* réduit le nombre des paramètres électromagnétiques et rend les inductances indépendantes du temps. De ce fait, nous avons :

$L_s=l_s-M_s$ est l'inductance cyclique statorique,

$L_r=l_r-M_r$ est l'inductance cyclique rotorique,

$M=(3/2) \cdot M_{sr}$ est l'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor,

Après développement, les tensions statoriques et rotoriques dans le repère de *Park* (d, q) s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + (d\Phi_{ds}/dt) - (d\theta_s/dt) \cdot \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + (d\Phi_{qs}/dt) - (d\theta_s/dt) \cdot \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + (d\Phi_{dr}/dt) - (d\theta_r/dt) \cdot \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + (d\Phi_{qr}/dt) - (d\theta_r/dt) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{II.53}$$

D'où :

ω_s est la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère statorique (S, abc),

ω_r est la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère rotorique (R, abc),

Ces vitesses ω_s et ω_r s'expriment respectivement comme suit :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \text{II.54}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad \text{II.55}$$

$$\omega = \omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt} = p \cdot \Omega_{mec} \quad \text{II.56}$$

D'où :

ω est la vitesse angulaire de la machine [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] et Ω_{mec} est la vitesse mécanique de la MADA en [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$].

Les équations des flux dans le repère de Park sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{qs} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{dr} \end{cases} \quad \text{II.57}$$

Le couple électromagnétique est obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. Il résulte plusieurs expressions toutes égales [Sylla 2013], [Caron 1995]:

$$\begin{aligned}
C_{em} &= p \cdot (\Phi_{qr} \cdot i_{dr} - \Phi_{dr} \cdot i_{qr}) \\
C_{em} &= p \cdot M \cdot (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \\
C_{em} &= p \cdot (M/L_s) \cdot (\Phi_{qs} \cdot i_{dr} - \Phi_{ds} \cdot i_{qr}) \\
C_{em} &= p \cdot (M/L_r) \cdot (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \\
C_{em} &= (p \cdot (1 - \sigma) / \sigma \cdot M) \cdot (\Phi_{dr} \cdot \Phi_{qs} - \Phi_{qr} \cdot \Phi_{ds})
\end{aligned} \tag{II.58}$$

Les puissances active et réactive statoriques et rotoriques, exprimées dans le repère diphasé (d, q), s'écrivent comme suit :

$$\begin{aligned}
P_s &= V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} \\
Q_s &= V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} \\
P_r &= V_{dr} \cdot i_{dr} + V_{qr} \cdot i_{qr} \\
Q_r &= V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr}
\end{aligned} \tag{II.59}$$

II.5.5.3 Commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté

La commande vectorielle de la machine asynchrone doublement alimentée consiste à rendre le comportement de la MADA analogue à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, du point de vue variation de vitesse, et cela en réalisant un découplage entre le flux et le couple électromagnétique [Toufouti 2008]. La commande à flux orienté vise à positionner de façon optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants en vue d'avoir le mode de fonctionnement souhaité de la machine asynchrone [Ayoub 2013]. Dans la littérature, il existe différentes classifications de la commande vectorielle selon : la source d'énergie (commande en tension / en courant) ; l'orientation des axes d et q (le flux statorique / rotorique / d'entrefer) ; le contrôle du flux (Directe par mesure du vecteur flux/ Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement).

Nous avons choisi d'appliquer à la MADA une commande vectorielle par orientation du flux statorique selon l'axe direct d . Dans ce cas, nous obtenons alors :

$$\Phi_{qs} = 0 \text{ et } \Phi_{ds} = \Phi_s \tag{II.60}$$

Les expressions des courants statoriques sont déduites des équations des composantes directes et en quadrature du flux statorique :

$$i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \tag{II.61}$$

$$i_{ds} = \frac{\Phi_{ds}}{L_s} - \frac{M \cdot i_{dr}}{L_s} \tag{II.62}$$

L'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = p \cdot \Phi_{ds} \cdot i_{qs} \quad \text{II.63}$$

Le couple électromagnétique peut s'écrire sous une autre forme en remplaçant i_{qs} de l'équation (II.61) dans l'équation (II.63) :

$$C_{em} = -p \cdot \Phi_{ds} \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \quad \text{II.64}$$

Vu que le stator est alimenté directement par le réseau électrique, alors le flux statorique est proportionnel à la tension du réseau et en négligeant la résistance statorique R_s pour les machines de petites puissances comme pour notre étude, l'expression des tensions statoriques dans l'équation (II.53), nous obtenons ce qui suit :

$$v_{ds} = 0 \text{ et } v_{qs} = \omega_s \cdot \Phi_{ds} \quad \text{II.65}$$

L'expression du flux statorique peut être écrit selon [3kw] comme suivant :

$$\Phi_{ds} = \frac{U_s}{\omega_s} = \text{constante} \quad \text{II.66}$$

Avec :

U_s est la tension efficace de ligne,

ω_s est la pulsation statorique du réseau,

En tenant compte des simplifications et en remplaçant i_{ds} et i_{qs} dans les expressions des puissances statoriques active et réactive, nous obtenons ce qui suit :

$$\begin{aligned} P_s &= -\frac{U_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s &= \frac{U_s \cdot \Phi_s}{L_s} - \frac{U_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{aligned} \quad \text{II.67}$$

Aussi, avec l'orientation du flux statorique, la puissance réactive du stator s'écrit comme suit :

$$Q_s = \frac{3}{2} \cdot v_{qs} \cdot i_{ds} \quad \text{II.68}$$

La puissance réactive est supposée nulle car le facteur de puissance du réseau est égal à 1 ($\cos \varphi=1$) et le courant $i_{ds} = 0$ [Ayoub 2013], alors la puissance réactive donnée dans l'équation (II.67) peut être réécrite comme suit :

$$\Phi_{ds} = M \cdot i_{dr} \quad \text{II.69}$$

La commande de la machine est assurée dans notre cas par trouver la relation entre les courants et les tensions rotoriques de la machine, elle est donnée par les équations suivantes :

$$v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + L_r \cdot \sigma \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - e_q \quad \text{II.70}$$

$$v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + L_r \cdot \sigma \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + e_d + e_\phi \quad \text{II.71}$$

Avec :

$$e_q = -\omega_r \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \quad \text{II.72}$$

$$e_d = \omega_r \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} \quad \text{II.73}$$

$$e_\phi = \omega_r \cdot \sigma \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_s \quad \text{II.74}$$

Le couple électromagnétique exprimé dans l'équation (II.65) est en fonction de la composante en quadrature du courant rotorique. Le courant en quadrature de référence peut être calculé par rapport à la vitesse désirée. Alors que la composante directe du courant rotorique est calculée à partir du flux de référence.

La régulation MPPT en utilisant les régulateurs du type *Proportionnel-Intégral (PI)* :

L'utilisation des régulateurs du type Proportionnel-Intégral (PI) permet de réguler les courants rotoriques réels aux valeurs des courants rotoriques de référence et aussi de générer les tensions rotoriques de référence. Les équations (II.70) et (II.71) peuvent être représentés par le schéma bloc suivant :

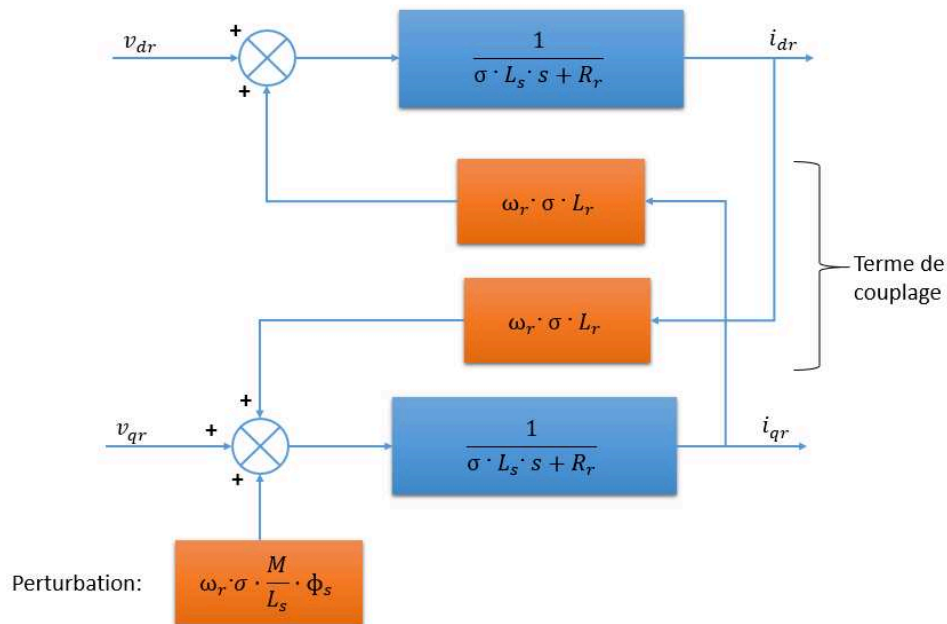


Figure II.20 Schéma bloc de génération des courants rotoriques

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux courants rotoriques.

L'équation (II.64) du couple électromagnétique, montre qu'avec la commande vectorielle à flux statorique orienté de la MADA, le couple électromagnétique est contrôlé par le courant de quadrature. Le courant de quadrature de référence i_{qr_ref} peut-être donc calculé par rapport à la vitesse de la MADA désirée. Alors que le courant rotorique direct de référence i_{dr_ref} est calculé à partir de la puissance réactive statorique Q_s selon l'équation (II.67). La figure suivante, montre le schéma bloc de la commande vectorielle de la MADA en vue de générer les tensions rotoriques de référence.

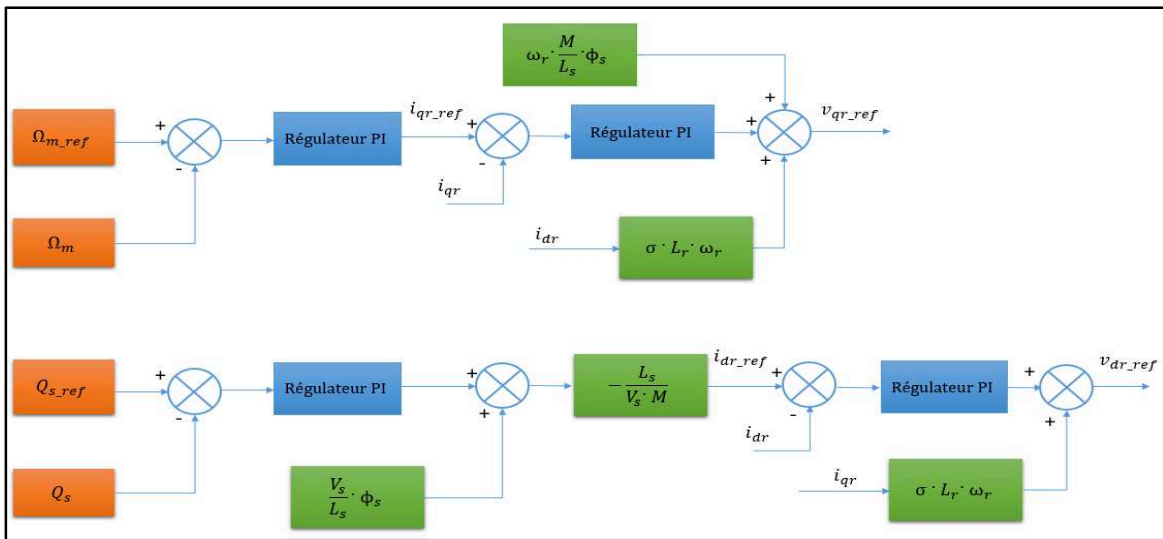


Figure II.21 Schéma bloc de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté

Les paramètres des régulateurs PI de régulation de la vitesse de la MADA, de la puissance réactive statorique et des courants rotoriques direct et de quadrature, sont présentés dans la partie des annexes.

II.6 Modélisation des convertisseurs statiques

Les convertisseurs utilisés dans le système éolien étudié, consistent en un redresseur réalisé à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture, et un onduleur de tension triphasé composé de trois bras d'interrupteurs réversibles en courant, commandés à l'ouverture et à la fermeture ; chaque bras est constitué de deux interrupteurs, chacun contient un transistor bipolaire à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT) et une diode montée en antiparallèle. Le condensateur C de tension V_{dc} permet le stockage de l'énergie en sortie du redresseur. En vue d'éliminer les fluctuations de la tension du bus continu DC, des stratégies de contrôle sont appliquées [Riouch 2012]. Le filtre passif du type (L, R) est utilisé pour raccorder l'onduleur au réseau électrique. La figure suivante montre les convertisseurs d'électronique de puissance utilisés :

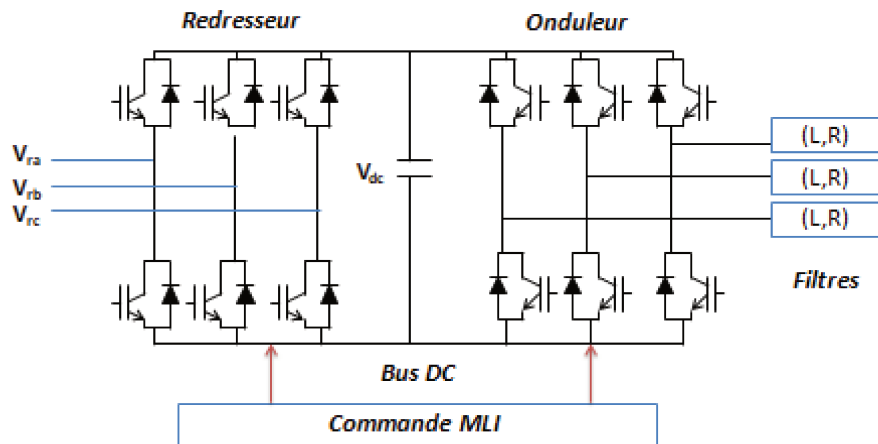


Figure II.22 Structure des convertisseurs d'électronique

Les deux convertisseurs employés sont commandés à l'aide de la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). La commande MLI consiste à transformer un signal sinusoïdal connu sous modulante tension de référence en une tension sous forme de succession de créneaux, appelée signal modulé. Le principe de cette commande repose sur la comparaison de la modulante avec une tension de forme triangulaire à haute fréquence nommée porteuse. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux permet de commander chaque bras du convertisseur [Tamaarat 2015].

L'instant de commande des interrupteurs correspond à l'instant d'intersection des deux signaux. La figure suivante résume le principe de la commande MLI.

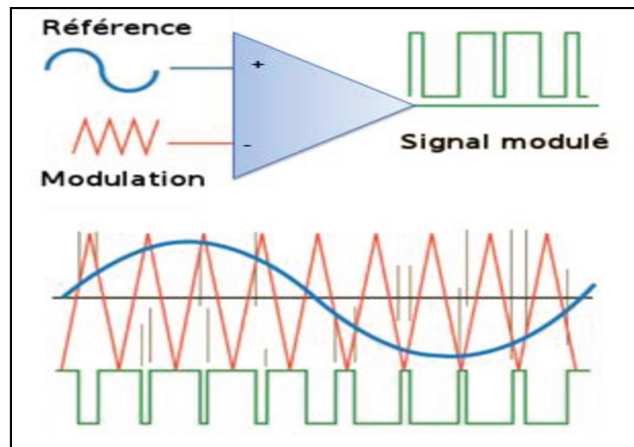


Figure II.23 Principe de la commande MLI

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur sont écrites comme suit :

$$\begin{cases} V_{sab} = (S_a - S_b) \cdot V_{dc} \\ V_{sbc} = (S_b - S_c) \cdot V_{dc} \\ V_{sca} = (S_c - S_a) \cdot V_{dc} \end{cases} \quad \text{II.75}$$

Où :

S_i représente les états des interrupteurs supposés idéaux pour faciliter la modélisation du redresseur, définis par :

$$S_i = \begin{cases} 1, \bar{S}_i = 0 \\ 0, \bar{S}_i = 1 \end{cases} ; i=a, b, c \quad \text{II.76}$$

D'où les tensions simples sont déduites :

$$\begin{cases} V_{Sa} = \frac{2 \cdot S_a - S_b - S_c}{3} \cdot V_{dc} \\ V_{Sb} = \frac{2 \cdot S_b - S_a - S_c}{3} \cdot V_{dc} \\ V_{Sc} = \frac{2 \cdot S_c - S_a - S_b}{3} \cdot V_{dc} \end{cases} \quad \text{II.77}$$

Nous obtenons finalement les équations des tensions rotoriques et l'équation du couplage continu DC :

$$[V_{rabc}] = R_r \cdot [i_{rabc}] + L_r \cdot \frac{d}{dt} [i_{rabc}] + [V_{sabc}] \quad \text{II.78}$$

$$C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a \cdot i_{sa} + S_b \cdot i_{sb} + S_c \cdot i_{sc}) - i_{dc} \quad \text{II.79}$$

Les équations présentées ci-dessus (II.75), (II. 76) et (II.77) sont schématisées par les figures suivantes :

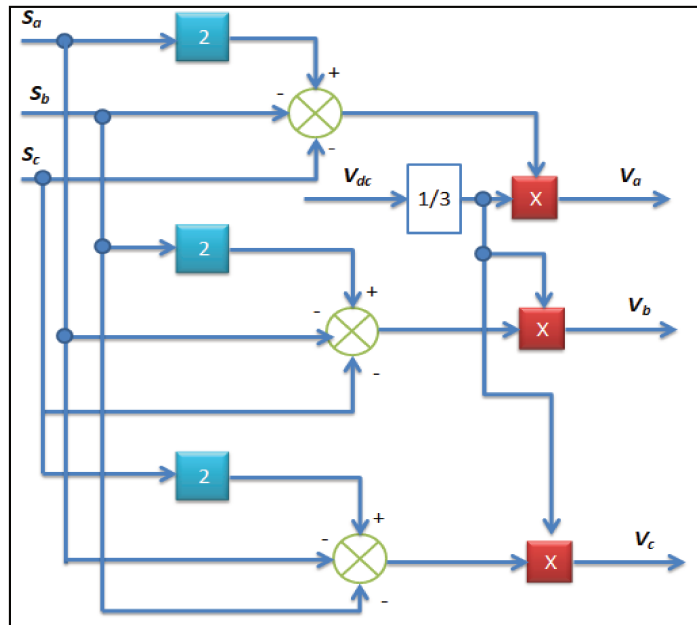


Figure II.24 Schéma bloc de l'Onduleur

Les équations (II.78) et (II.79) peuvent être représentées par la figure suivante :

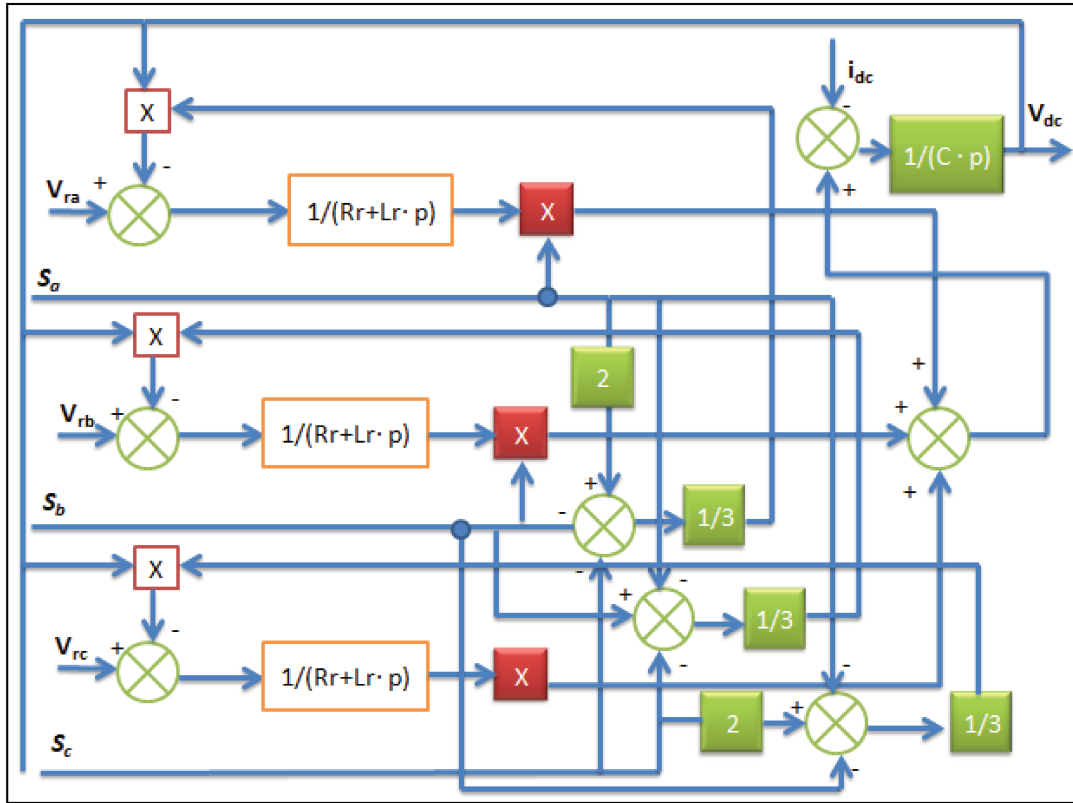


Figure II.25 Schéma du redresseur

II.7 Résultats des simulations

Afin de valider le modèle établi de l'éolienne à vitesse variable et de sa stratégie de commande, le système complet a été modélisé et simulé à l'aide du logiciel MATLAB & Simulink. Les paramètres de la turbine éolienne et de la MADA de puissance nominale de (3kW), ont été extraits des travaux de recherche présentés dans [Krafczyk 2013].

Le tableau suivant présente les paramètres de la turbine et de la MADA du modèle :

Tableau II.2 Les paramètres du modèle simulé

Turbine	Rayon des pales R	1.483 [m]
	Rapport de multiplication G	3.32
	Densité de l'air ρ	1.225 [kg/m ³]
	Moment d'inertie de la turbine $J_{turbine}$	0.03615 [kg/m ²]
	Vitesse relative optimale λ_{opt}	7
	Coefficient de puissance maximal C_{pmax}	0.35
	Coefficient de frottement visqueux f_v	0.0020 [N. m .s /rad]
MADA	Puissance nominale P_{MADA}	3000 [W]
	Nombre de paires de pôles p	2
	Résistance statorique d'une phase R_s	1.94 [Ω]
	Résistance rotorique d'une phase R_r	0.30 [Ω]
	Inductance statorique cyclique L_s	201.51 [mH]
	Inductance rotorique cyclique L_r	19.10 [mH]
	Inductance mutuelle cyclique M	59.71 [mH]
	Tension nominale stator U_s	380 [V]
	Intensité nominale stator I_s	8.1 [A]

Un essai de simulation a été effectué en utilisant le profil du vent aléatoire appliqué à l'entrée de l'éolienne, montré sur la figure II.26. La puissance aérodynamique disponible au niveau de la turbine est P_{aer} est montrée sur la figure II.27.

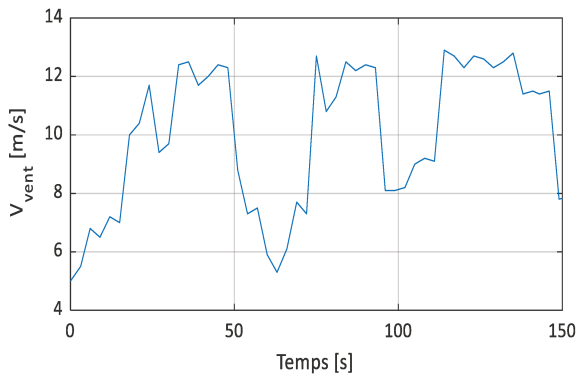


Figure II.26 Vitesse du vent [m/s]

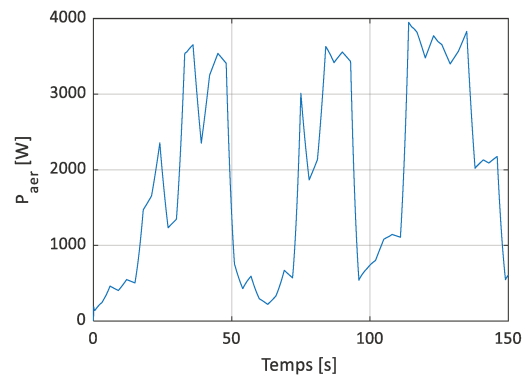


Figure II.27 Puissance aérodynamique [W]

La vitesse de la turbine et la vitesse mécanique de l'arbre sont illustrées respectivement sur la figure II.28 et la figure II.29. Nous remarquons que durant les 150 secondes de simulation du système éolien, la génératrice opère dans les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone.

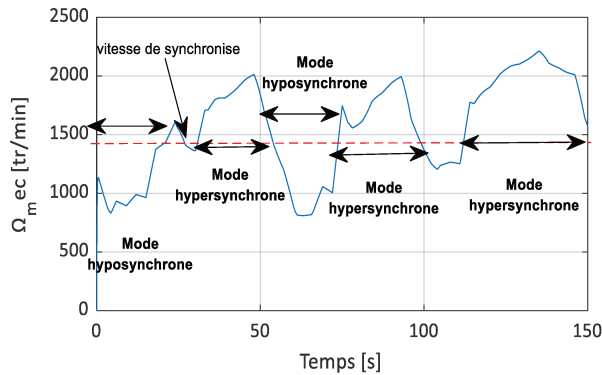


Figure II.28 Vitesse mécanique [tr/min]

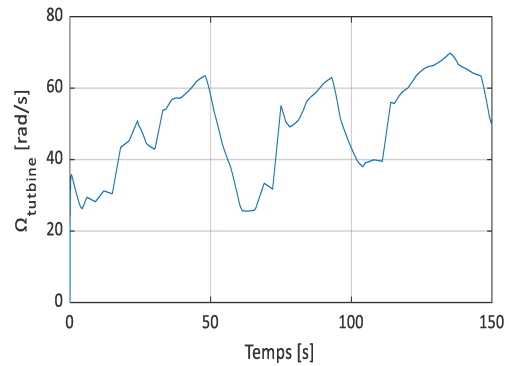


Figure II.29 Vitesse de la turbine [rad/s]

Les figures II.30 et II.31 présentent respectivement la variation du rapport de vitesse λ et le coefficient de puissance C_p en fonction du temps.

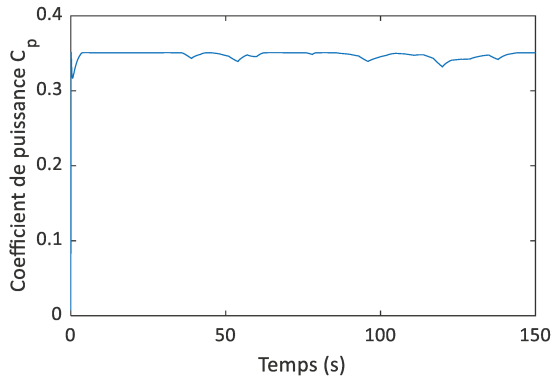


Figure II.30 Coefficient de puissance C_p

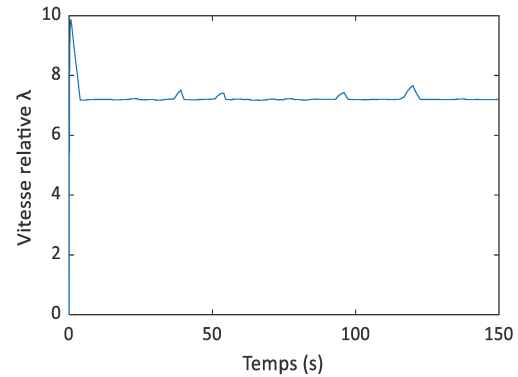


Figure II.31 Vitesse relative λ

Nous constatons que les courbes du coefficient de puissance C_p et de la vitesse relative correspondent respectivement à la valeur maximale C_{pmax} et à la valeur optimale de la vitesse λ_{opt} , présentées sur le tableau ci-dessus.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de simulation de la partie électrique du système éolien étudié, dont les caractéristiques électriques de la MADA, des convertisseurs statiques et leur connexion capacitive. Les figures II.32 et II.33 présentent les courants triphasés du stator de la MADA. Les courants rotoriques triphasés de la MADA sont illustrés sur les figures II.34 et II.35. Les tensions statoriques triphasées de la MADA sont données sur la figure II.36, aussi les tensions sous forme de signaux en créneau, récupérées à la sortie du convertisseur coté MADA sont présentées sur la figure II.37.

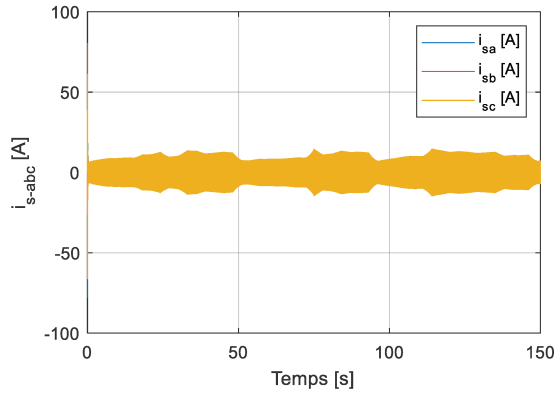


Figure II.32 Courants statoriques triphasés [A]

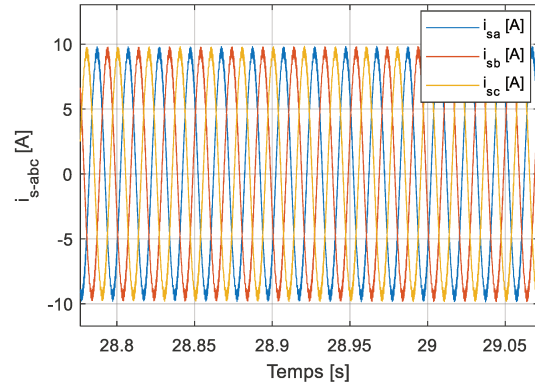


Figure II.33 Zoom sur les courants statoriques triphasés [A]

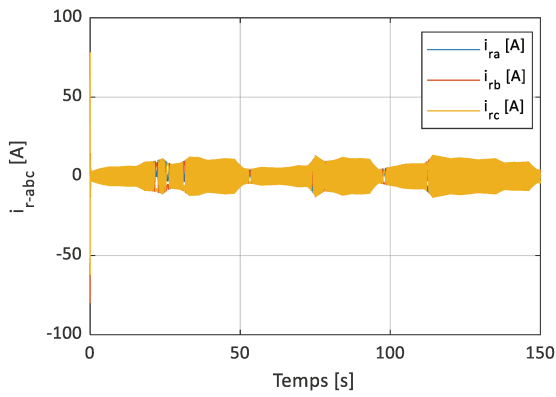


Figure II.34 Courants rotoriques triphasés de la MADA [A]

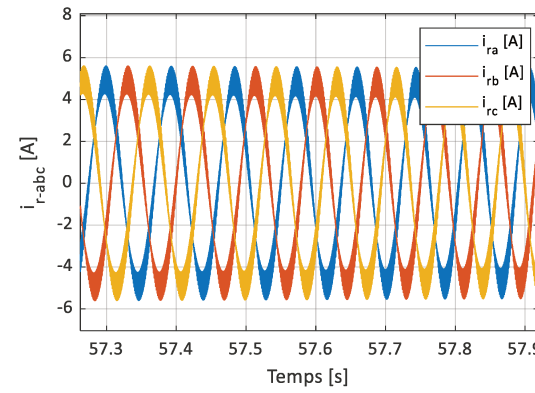


Figure II.35 Zoom sur les courants rotoriques triphasés de la MADA [A]

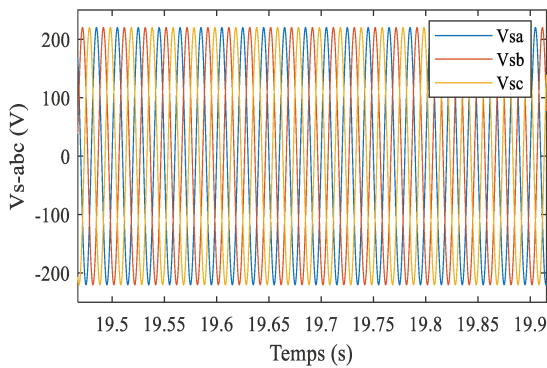


Figure II.36 Tensions statoriques triphasées de la MADA [V]

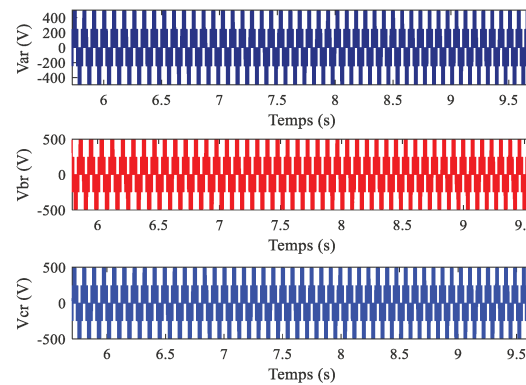


Figure II.37 Tensions à la sortie du convertisseur côté de la MADA [V]

En appliquant un filtrage du premier ordre du type (R, L) aux tensions rotoriques sous forme de signaux en créneau, nous obtenons les tensions illustrées sur la figure II. 38 et la figure II. 39. présente la tension du bus continu V_{dc} .

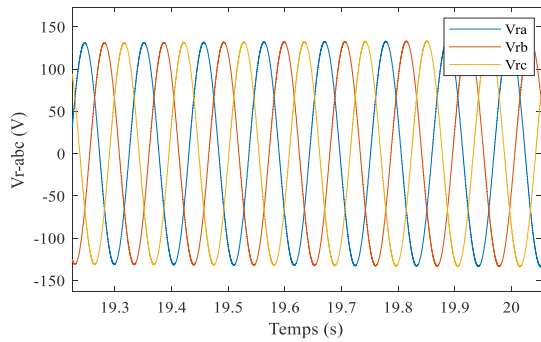


Figure II.38 Tensions triphasées au rotor de la MADA [V]

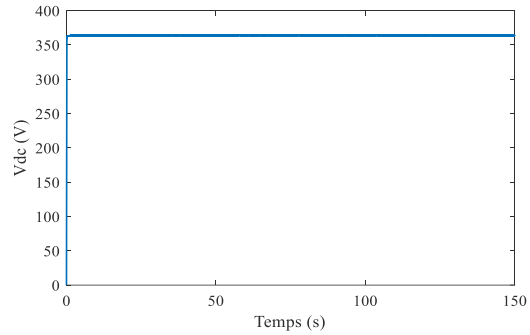


Figure II.39 Tension du bus continu Vdc [V]

II.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats de modélisation et de simulation d'une éolienne fonctionnant à vitesse variable et entraînant une machine à induction doublement alimentée. Afin de générer une puissance électrique efficace et rapide, les techniques de contrôle sont appliquées, telles que : Le contrôle MPPT pour la turbine éolienne et le contrôle vectoriel à flux statorique orienté sont utilisés pour la MADA. La simulation du fonctionnement de l'éolienne et de ses méthodes de contrôle sont établies dans l'environnement MATLAB & Simulink. Les signaux obtenus sont exploités pour la conception de méthodes de diagnostic de défauts dans chapitre suivant.

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation et la commande du système éolien à base de la MADA. En premier lieu, la description du système éolien a été établie. Ensuite, la modélisation et la commande de la turbine éolienne ont été présentées. La commande et la modélisation de la machine asynchrone doublement alimentée ont été établies ainsi que la modélisation des convertisseurs statiques permettant le raccordement de la MADA au réseau électrique. Enfin, des résultats de simulation de la modélisation et la commande du système éolien complet ont été présentés.

Chapitre III Approches de Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée d'une Éolienne, par les Filtrés de Kalman

III.1 Introduction

Selon le premier chapitre, il s'est avéré qu'un système éolien est l'assemblage de plusieurs sous-systèmes subissant des conditions de fonctionnement sévères : conditions climatiques variables (vent, température, rafale...), sollicitations mécaniques, emplacement géographique (mer, montagne, côtes...). La défaillance de l'un de ses composants nuira aux performances du système complet et entraînera des arrêts non programmés, ce qui conduit à des pertes de production et des coûts élevés de maintenance corrective et de réparation ou de remplacement des composants.

Afin de pallier ces problèmes, les ingénieurs ont développé la discipline de la sûreté de fonctionnement : la procédure de détection et d'isolation des défauts, connue sous l'acronyme anglo-saxon FDI (Fault Detection and Isolation), cette dernière constitue le noyau d'un système de diagnostic des défauts.

L'assureur *Germanischer Lloyd* dans le rapport intitulé '*Condition Monitoring Systems (CMS) pour les Éoliennes*' publié en 2010 par *ifm electronic gmbh*, montre que les risques de défaillances des éléments mécaniques d'une éolienne sont donnés en pourcentage comme suit : Le multiplicateur (32%), le générateur (23%), les roulements (11%) et les pales (< 10%). En outre, les défaillances des pales, des génératrices et des multiplicateurs (boîtes de vitesses) dans une éolienne, représentent une proportion substantielle par rapport aux défaillances totales du système éolien en termes de temps d'arrêt [Hahn, Durstewitz and Rohrig, 2006] et de coûts de réparation [Lee *et al.*, 2015].

Dans cette thèse, nous nous sommes focalisé sur le diagnostic des défauts de l'entité électrique tournante du système éolien, qui est la machine asynchrone doublement alimentée, car bien qu'elle soit réputée robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique des défaillances. Le diagnostic des défauts des machines électriques a fait l'objet de différentes recherches et a donné apparition à plusieurs approches et techniques de diagnostic présentées dans le premier chapitre consacré à l'état d'art sur les méthodes de diagnostic.

Un système de diagnostic permet de détecter, de localiser et d'isoler les défauts qui peuvent affecter un processus donné. Il fait partie du concept général de la surveillance et de supervision des systèmes industriels. Le recours à l'utilisation d'un système automatique de diagnostic des défauts pour les machines électriques est justifié par le fait que l'approche traditionnelle, basée sur l'inspection régulière, l'entretien préventif et le remplacement des pièces défaillantes, engendre des coûts onéreux vu le temps, la main-d'œuvre et l'expertise immobilisés pour l'achèvement de

cette tâche et dans la plupart des cas cette approche ne permet pas la détection précoce de l'évolution de la défaillance.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser au diagnostic automatique des défauts de la machine asynchrone à double alimentations d'une éolienne, en se basant sur les observateurs d'état de Kalman. Cette approche vise à reconstruire les variables d'état à surveiller, du système en mode de fonctionnement sain, et ensuite de les comparer à ces mêmes variables d'état mais dans le cas de présence d'un défaut : qu'il soit un défaut capteur, un défaut actionneur ou un défaut système ou encore appelé défaut composant. Et cela, dans le but de générer des indicateurs de défauts appelés '*Résidus*'. En analysant et en évaluant ces derniers par le moyen des méthodes statistiques, nous pouvons par conséquent confirmer la présence des défauts et les différencier des bruits et des perturbations pouvant éventuellement affecter le système, de déterminer leur temps d'occurrence et de déterminer leur durée.

Il est question, dans un premier temps, de décrire les différents types de défauts pouvant affecter une machine asynchrone doublement alimentée d'une éolienne, en vue de déterminer leur fréquence de présence et leurs causes internes et externes. Ensuite, nous présenterons la procédure proposée de diagnostic, basée sur les observateurs de Kalman, pour les défauts capteurs simples et simultanés, les défauts actionneurs et les défauts composants de la génératrice de l'éolienne.

III.2 Défauts de la MADA

III.2.1 Classification des défauts de la machine électrique

Les défauts de la machine électrique, dont la machine asynchrone doublement alimentée, peuvent être classifiés selon leurs causes, en deux grandes classes : les défauts à causes internes et les défauts à causes externes :

-Les défauts internes proviennent des défauts des composants de la machine comme les enroulements statoriques et rotoriques, circuits magnétiques, cage rotorique dans le cas d'une machine à cage d'écureuil, l'entrefer mécanique...etc.

-Les défauts externes ont pour origine l'environnement extérieur où la machine est utilisée, la nature d'alimentation, le type de la charge...etc.

Une deuxième classification des défauts est possible, selon la nature du défaut. Nous trouvons donc : les défauts électriques et les défauts mécaniques.

-Les défauts électriques :

*Au niveau du stator : défaut d'isolant, court-circuit entre spires d'une même phase, court-circuit entre deux phases, court-circuit entre phase et le bâti, défaut du circuit magnétique.

*Au niveau des circuits électriques rotoriques : idem pour les défauts des circuits statoriques pour une machine asynchrone à rotor bobiné ; cassure ou fissure des barres ou des anneaux de court-circuit pour les machines à cage d'écureuil.

-les défauts mécaniques :

- * Défauts des roulements,
- * Défauts des flasques,
- * Défauts de l'arbre mécanique,
- * Excentricité statique, dynamique et mixte,
- * Défauts de déséquilibre massique ou « Balourd ».

Le tableau suivant résume les défauts électriques et mécaniques de la machine électrique, leurs causes et leurs effets :

Tableau III.1 Les défauts de la machine électrique, leurs causes et leurs effets

	Défaut	Causes	Effets
Défauts Mécaniques	-Défauts de roulements : Trous dans les gorges du roulement, Ondulation de la surface du roulement, Effritement de surface, Fissure.	-L'écaillage de fatigue, -La contamination du lubrifiant ou mauvaise lubrification, -Une charge excessive, -Courants de fuite induits par les onduleurs multiniveaux (MLI).	-Bruit excessif, -Grand niveau des vibrations suite au déplacement du rotor autour de l'axe longitudinal du rotor, -Oscillations dans le couple de la charge,
	-Défauts des flasques	-Mauvaise conception, -Mauvais montage, -Mauvais alignement des flasques, -Manque de lubrification,	-Vibrations, -Fluctuations du couple et de la vitesse, -Absorption excessive de courant,
	-Défauts d'excentricité statique, dynamique	-Mauvais usinage ou mauvais montage, -Décentrement du rotor par rapport au stator, -Défaut du centrage des flasques,	-Vibrations, -Augmentation du niveau sonore, -Frottement sur stator sur le rotor, -Diminution de l'entrefer, -Destruction totale de la machine,

		<ul style="list-style-type: none"> -Déformation du cylindre rotorique, -Mauvais centrage de la bride. -Détérioration des roulements à billes 	
	<ul style="list-style-type: none"> -Défauts de l'arbre mécanique : Désalignement, Flexion de l'arbre, 	<ul style="list-style-type: none"> -Fissure et microfissures, -Mauvais matériau de fabrication, -corrosion, - fatigue, -Excentricité statique ou dynamique, 	<ul style="list-style-type: none"> -Vibrations, - Robustesse de l'arbre affaiblie, -Arrêt irrémédiable de la machine,
	<ul style="list-style-type: none"> -Défaut de balourd (Déséquilibre) 	<ul style="list-style-type: none"> -Mauvais usinage, -Mauvais assemblage, -Mauvais montage, 	<ul style="list-style-type: none"> -Perte d'ailette, -Érosion ou encrassement, -Déformation du rotor -Vibrations
Défauts Électriques	<ul style="list-style-type: none"> Défauts au Stator/ au Rotor : -Défaut d'isolant dans un enroulement, 	<ul style="list-style-type: none"> -Réchauffement ou vieillissement, -Dégradation / détérioration de l'isolant électrique, -Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation, 	<ul style="list-style-type: none"> -Déséquilibre de phase dans les courants qui auront un effet direct sur le couple, -Oscillations de la vitesse mécanique, -Arrêt complet de la machine.

	<ul style="list-style-type: none"> - Court-circuit entre spires d'une même phase, - Court-circuit entre phases, - Défaut phase-terre, -Défaut du circuit magnétique 	<ul style="list-style-type: none"> -surtension, -température excessive, -Haute température, -Déséquilibre d'alimentation, -défaut d'installation - Défaut sévère d'excentricité statique ou / et dynamique, 	<ul style="list-style-type: none"> -Augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, - facteur de puissance modifié, -Fusion des conducteurs, -Déséquilibre des courants de phases, -Dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, -Surchauffe, -Surtension, -Élévation importante du courant,
--	---	---	--

D'après ce tableau, nous pouvons constater que ces défauts produisent différents symptômes majeurs, qui peuvent être récapitulés ainsi : [Trigeassou 2013]

- Des tensions et des courants déséquilibrés,
- Des oscillations de couple augmentés,
- Des pertes élevées,
- Une efficacité énergétique et un rendement diminués,
- Température excessive et vieillissement accéléré,
- Distorsion du champ magnétique tournant,
- Apparition d'harmoniques sur les signaux pertinents mesurés, d'ordre électrique ou mécanique, tels que les courants, les tensions, le flux, le couple et la vitesse.

III.2.2 Statistiques des défauts de la MADA

Dans cette section, nous allons présenter les différents défauts des machines électriques tournantes, dont la machine asynchrone à double alimentations, leur classification et leurs causes.

Malgré la variété et l'abondance des recherches et des études effectuées pour déterminer les défauts dans les machines asynchrones, il reste assez compliqué de fournir une répartition exacte des défaillances des différentes parties des machines électriques, car cela dépend de plusieurs facteurs, à savoir : le type de la machine, la nature d'alimentation, le type de charge, l'environnement de travail ou d'application et autres [Leboeuf 2018] et aussi parce que le

recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance.

Depuis les années 80 jusqu'à ce jour, plusieurs études statistiques ont été réalisées sur les machines asynchrones de moyennes et grandes puissances employées dans un environnement industriel en vue de déterminer la répartition des défauts dans les machines électriques. En effet, selon une étude statistique, réalisée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels, appelée Allianz, les défaillances des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) [Ondel 2006] sont réparties dans les différentes parties de la machine électrique comme ce qui est donné sur la figure suivante :

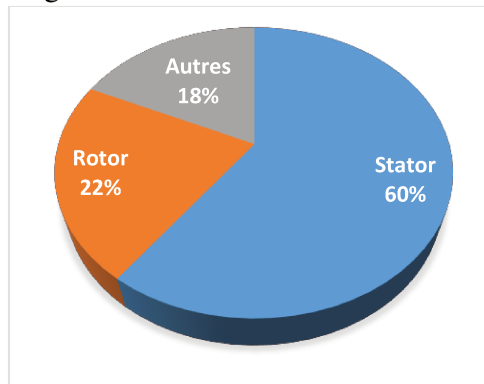


Figure III.1 Répartition des pannes dans les machines de moyennes puissances

Cette étude a montré que 60% des défaillances surviennent au niveau du stator, 22% au rotor et 18% dans d'autres parties de la machine comme les roulements.

Dans les années 90, des études ont été effectuées sur les machines asynchrones de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) par *Thorsen* [Thorsen and Dalva, 1995], [Thorsen and Dalva, 1999] et confirmées ensuite par *Thomson*, les résultats de ces études sont montrés sur la figure III.2. Une autre étude menée par *Bonnett* [Bonnett and Yung 2008] sur les machines asynchrones de forte puissance, utilisées dans l'industrie pétrochimique, a donné les résultats illustrés sur la figure III.3:

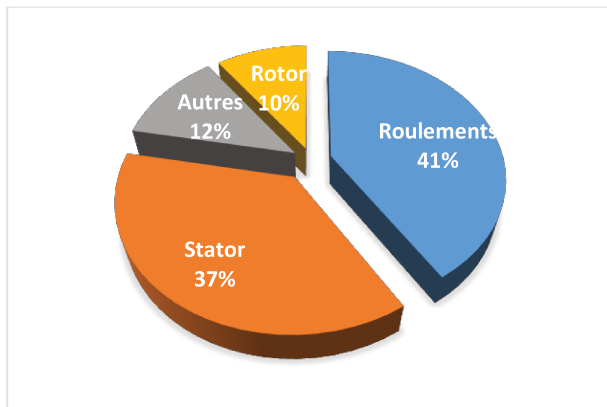


Figure III.2 Pourcentage des défauts selon Thomson

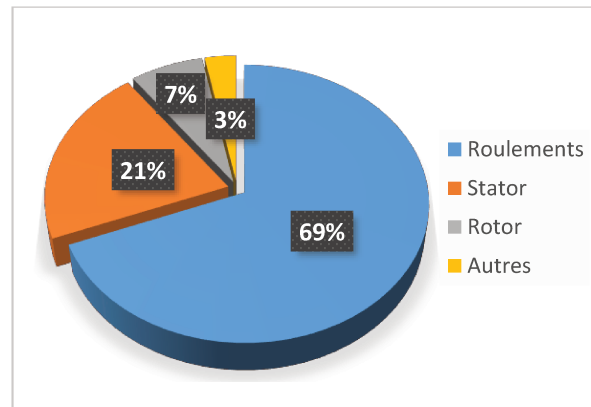


Figure III.3 Répartition des pannes selon Bonnett

La figure III.2 montre que la majorité des défaillances affectent les roulements (41%), le stator (37%), alors que les faibles pourcentages des pannes se situent au rotor (10%) et à d'autres parties de la machine pour un pourcentage de 12%. La Figure III.3 vient appuyer de plus les résultats obtenus par l'étude antérieure, en effet : les défaillances de roulements sont de 69%, les défaillances du stator (21%), tandis que les défaillances rotoriques sont de 7% et les autres types de défauts constituent que 3%. Nous pouvons donc remarquer selon ces deux études que le pourcentage des défauts de roulements dans les machines électriques de grande puissance, a augmenté en passant de 41% à 69%, tandis que celui des défauts statoriques et rotoriques est diminuée, il est passé de 37% à 21% pour le stator et de 10% à 7% pour les défauts du rotor. La diminution du pourcentage des défauts statoriques et rotoriques peut être justifié par le fait que la qualité des isolants utilisés est améliorée, la principale source de défaillance provient donc des roulements dans les machines asynchrones utilisées dans des applications nécessitant une forte puissance.

III.3 Diagnostic à base d'observateurs

III.3.1 Principe de diagnostic à base d'observateurs

Cette approche de diagnostic vise à comparer les variables mesurées d'un système physique, avec les variables estimées à partir du modèle, sujet aux mêmes signaux d'entrée que ceux du système réel. Ce dernier est modélisé sous forme de représentation d'état, qui n'est rien qu'un ensemble d'équations différentielles du premier ordre, linéaires ou non linéaires, permettant de décrire l'évolution temporelle du processus physique. Ce modèle d'état fait intervenir un nombre donné de variables internes 'variables d'état', qui sont généralement inaccessibles ou non mesurables pour des raisons pratiques, des raisons économiques (coûts supplémentaires d'installation de capteurs) ou des contraintes technologiques. Ces variables d'état sont estimées par le biais d'un capteur logiciel, appelé observateur.

Un observateur est un système dynamique construit à partir du modèle de fonctionnement sain du système réel. Il fournit les estimations des variables d'état et des sorties du système surveillé, en utilisant les signaux connus d'entrée et de sortie de celui-ci. La figure suivante montre le principe de reconstruction d'état par l'observateur, en utilisant les signaux d'entrée et de sortie du système physique.

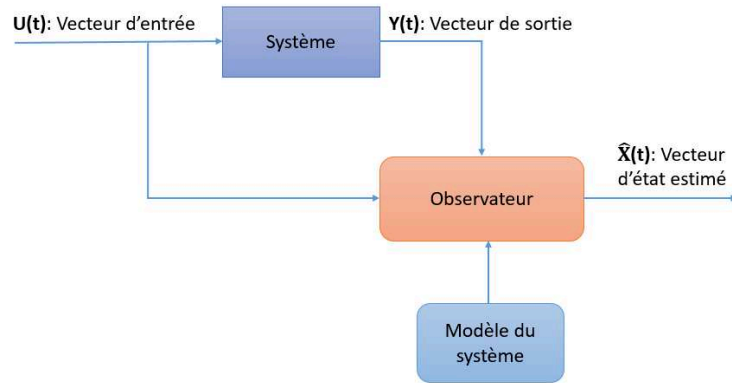


Figure III.4 Schéma du principe d'estimation d'état et de sortie d'un système [Trigeassou 2013]

Ensuite, les grandeurs estimées sont comparées à celles mesurées pour générer des indicateurs fiables de défaillances, appelés 'résidus'. Ces derniers sont théoriquement nuls en absence des défauts et différents de zéro en leur présence. Dans l'environnement de fonctionnement réel, caractérisé par la présence des bruits de mesure, des perturbations ou d'incertitudes, ces résidus ne sont pas nuls même si le système en question est en état sain. Alors, une procédure d'aide à la décision doit être appliquée aux résidus pour déclencher une alarme de présence de défaillance. La figure ci-après présente le principe sur lequel repose un générateur de résidus :

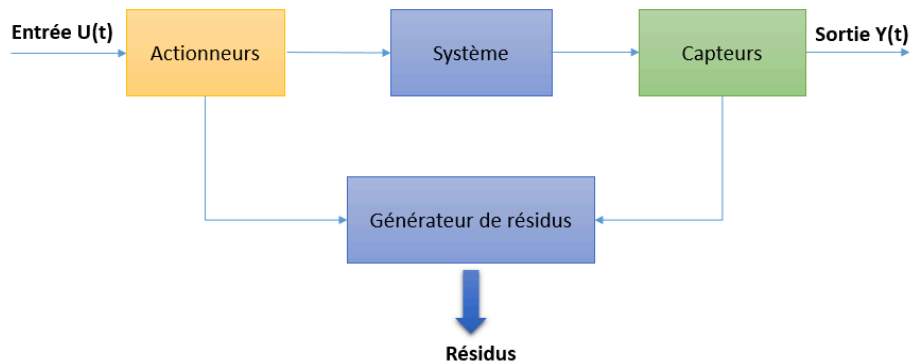


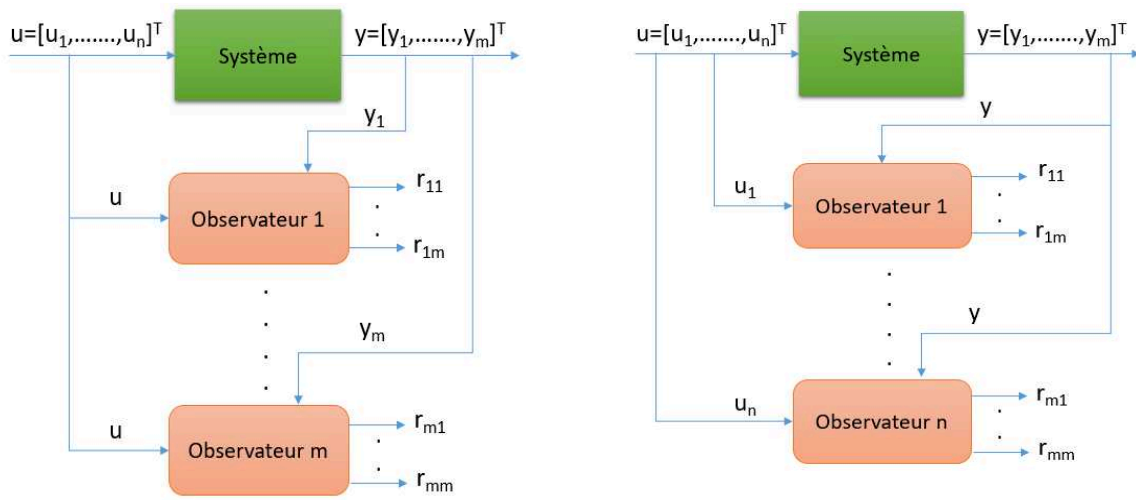
Figure III.5 Le principe de génération des résidus

Dans la littérature, deux méthodes de construction des résidus peuvent être utilisées : la construction des résidus structurés et la construction des résidus directionnels [Takrouni 2014]

-Les résidus structurés se caractérisent par le fait qu'ils sont sensibles à un sous-ensemble de défauts et insensibles ou robustes aux autres défauts. En effet, seuls les résidus sensibles à un défaut donné, s'éloignent de la valeur zéro pour alerter de la présence du défaut en question [Venkatasubramanian *et al.*, 2003]. Le Schémas d'Observateur Dédié DOS (*Dedicated Observer Scheme*) et le Schéma d'Observateur Généralisé GOS (*Generalized Observer Scheme*) fondé par Frank en 1990, sont proposés dans la littérature pour concevoir les résidus structurés, ces structures reposent sur le principe de construction d'un banc d'observateurs.

- Schéma d'Observateur Dédié (DOS : Dedicated Observer Scheme) :

Dans cette structure, proposée par [Clark R. N. 1975] ; dans le cas du diagnostic des défauts capteurs, nous construisons un banc d'observateurs dont le nombre est égal au nombre des sorties du système ; le $i^{\text{ème}}$ observateur dédié d'ordre réduit ou plein, est piloté par la $i^{\text{ème}}$ sortie et toutes les entrées du système. Lorsque la $i^{\text{ème}}$ sortie mesurée est défaillante, le $i^{\text{ème}}$ observateur reconstruit toutes les sorties du système et fournit des variables estimées éloignées de celles mesurées, alors que les autres observateurs donnent des estimations qui convergent vers les sorties mesurées correspondantes sauf pour la sortie erronée. Ensuite, *Chen et Saif* [Chen, W. 2005] ont étendu l'usage de ce schéma pour le diagnostic des défauts actionneurs. Dans ce cas, le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par la $i^{\text{ème}}$ entrée et toutes les sorties du système. Les sorties estimées de l'observateur, piloté par l'entrée erronée, divergent des sorties mesurées du système ; les autres observateurs pilotés par les entrées saines, fournissent des bonnes estimations. La structure DOS pour le diagnostic des défauts capteurs et actionneurs est présentée dans la figure suivante :



(a) Schéma DOS- Défauts capteurs

(b) Schéma DOS- Défauts actionneurs

Figure III.6 Structure DOS pour le diagnostic des défauts capteurs et actionneurs

- Schéma d'Observateur Généralisé (GOS : Generalized Observer Scheme) :

Dans ce schéma, chaque résidu est sensible à tous les défauts sauf un. Dans le cas de diagnostic des défauts capteurs, le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par toutes les entrées et toutes les sorties du système sauf la $i^{\text{ème}}$. Cet observateur est donc sensible aux défauts de toutes les sorties sauf le défaut de la $i^{\text{ème}}$ sortie. Ce même principe est appliqué dans le cas de diagnostic des défauts actionneurs. La structure GOS pour le diagnostic des défauts capteurs et actionneurs, est plus robuste que le DOS du fait que les observateurs dans le schéma GOS sont pilotés par plusieurs sorties [Falcoz Alexandre, 2009]. La figure ci-dessous illustre le diagnostic à base du schéma GOS pour les défauts capteurs et actionneurs :

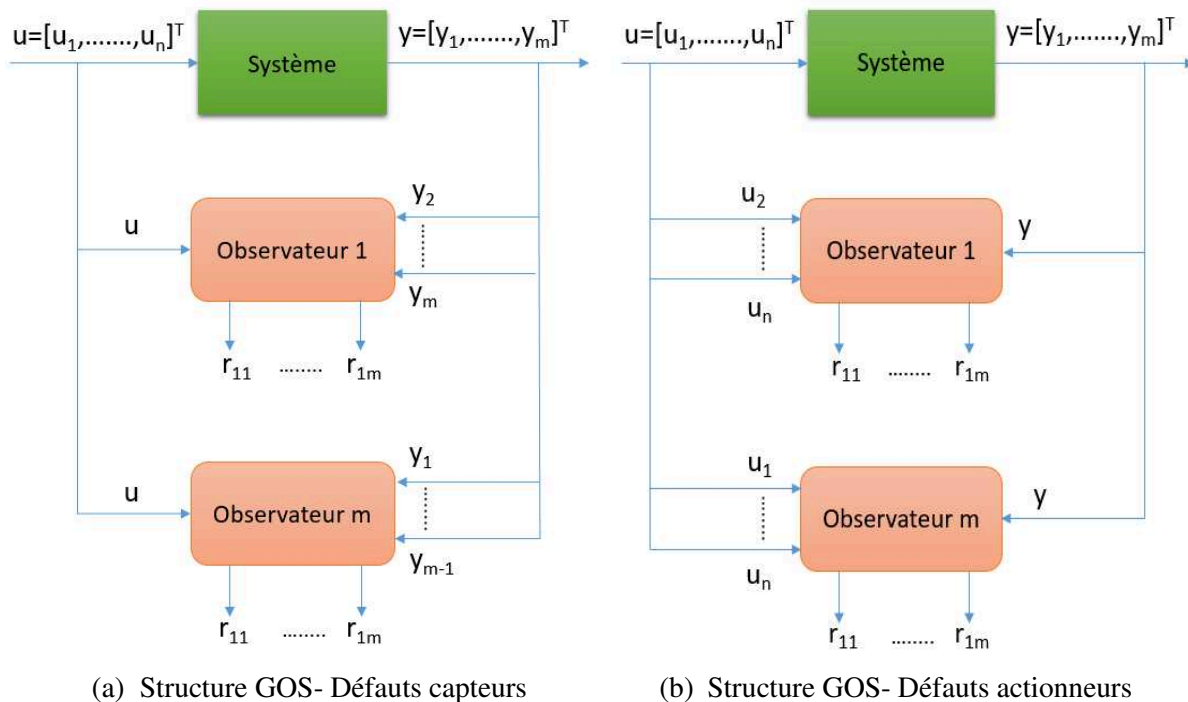


Figure III.7 Schéma GOS pour le diagnostic des défauts capteurs et actionneurs

- Les résidus directionnels sont des résidus sous forme de vecteurs, orientés suivant une direction précise, en présence d'un défaut donné, dans l'espace des résidus. Le vecteur résidu est noté $\vec{r}(t)$, agissant à un défaut $f_i(t) (i=1, \dots, n)$, s'écrit sous la forme suivante :

$$\vec{r}(t/f_i) = \alpha_i(t) \cdot \rho_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \tag{III.1}$$

Où ρ_i est un vecteur constant nommé signature directionnelle du défaut f_i dans l'espace des résidus, α_i est une fonction scalaire dépendante de l'amplitude de la dynamique du défaut f_i .

Le défaut est localisé par la détermination de la signature directionnelle théorique la plus proche de la signature directionnelle réelle issue du calcul des vecteurs de résidus. Considérons, le problème de localisation de défaut, illustré sur la figure suivante :

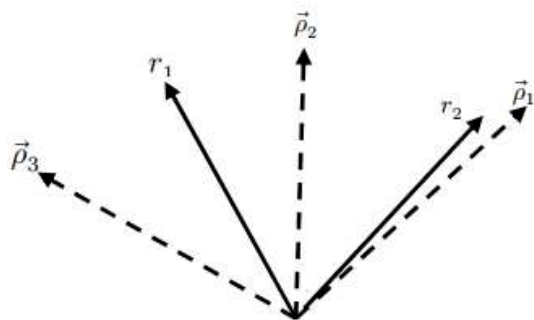


Figure III.8 Les résidus directionnels [Methnani 2013]

Avec :

-En trait plein, les signatures directionnelles théoriques r_1 et r_2 respectivement des défauts f_1 et f_2 .

-En trait pointillé, les signatures directionnelles réelles $\vec{\rho}_1$, $\vec{\rho}_2$ et $\vec{\rho}_3$.

D'après la figure, nous remarquons que la signature directionnelle réelle r_2 est plus proche de la signature directionnelle théorique ρ_1 . Ces deux signatures directionnelles ne coïncident pas vraiment à cause des perturbations dont l'importance est considérée moindre devant celle des défauts. Tandis que, la signature directionnelle réelle r_1 est loin des signatures théoriques ρ_2 et ρ_3 , ce qui rend la tâche de localisation du défaut f_1 plus difficile.

III.3.2 Classification des observateurs

Les observateurs peuvent être classifiés en trois principales catégories, et qui sont : [Chahmi, A. 2017]

- Les observateurs stochastiques : ces observateurs estiment de façon optimale les états du système, fonctionnant dans un environnement stochastique avec la présence du bruit. Dans cette catégorie, nous trouvons : le filtre de *Kalman* introduit par *Kalman-Bucy* en 1961, le filtre *DMZ* conçu par *Yao* et *Hu* en 2001, le filtre à particule de *Blom* et *Bloem* proposé en 2004.

-Les observateurs déterministes : ces observateurs sont utilisés dans le cas d'estimation des états d'un système opérant dans un environnement déterministe, où les bruits de mesures, les perturbations et les incertitudes des variables d'état ne sont plus prises en considération. Nous citons, dans cette classe : l'observateur de *Luenberger* introduit par *Luenberger* (1994), l'observateur à grand gain proposé (1999) par *Hammouri et al.*, l'observateur algébrique d'*Ibrir* en 2003, l'observateur à horizon glissant introduit par *Mayne et Michalska* (1992) et l'observateur intelligent de *Schröder* (2000),

-Les observateurs adaptatifs : ce sont les observateurs sont composés d'observateurs d'état avec un modèle à paramètres inconnus et d'algorithmes d'adaptation en ligne de ces paramètres du modèle. Les algorithmes adaptatifs sont synthétisés par les deux approches suivantes : • Approche basée sur l'analyse de *Lyapunov*, • Approche basée sur l'optimisation d'un critère d'erreur de sortie. Sous ce type, nous distinguons : l'observateur par intervalles introduit par *Li et Dahhou* (2007), observateur parallèle proposé par *Thein et Misawa* (1999) et l'observateur multi-modèles conçu par *Morel et al.* (2006) et par *Zhang* (1999). La figure suivante présente les trois catégories d'observateurs :

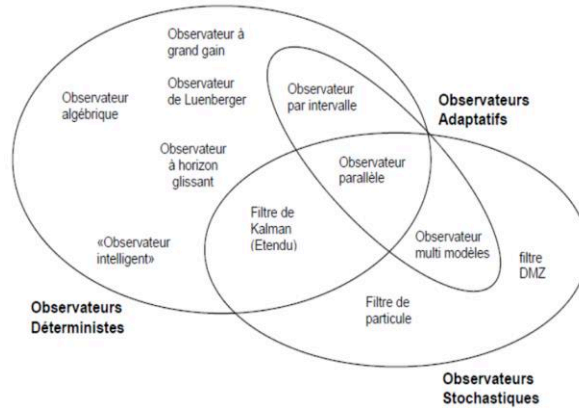


Figure III.9 Les trois principales catégories d’observateurs [Chahmi, A. 2017]

Nous constatons que quelques observateurs appartiennent à plusieurs groupes en même temps tel que le filtre de Kalman qui fait partie de la catégorie d’observateurs déterministes et stochastiques, tandis que l’observateur par intervalle appartient aux trois catégories.

Une autre classification des observateurs dépend de la linéarité ou non du modèle d’état du système à surveiller, on trouve donc :

-Les observateurs linéaires : s’intéressent aux systèmes linéaires invariants au cours de temps. Cependant, la majorité des systèmes industriels et technologiques possèdent des comportements non linéaires ce qui a poussé les chercheurs à concevoir des **observateurs non linéaires**.

Le choix de l’observateur n’est pas le fruit du hasard, mais il dépend du modèle du système à observer, de la nature de l’environnement dans lequel le système opère et de la nécessité ou non du suivi d’évolution des variables d’état du système en temps réel. Pour la machine asynchrone à double alimentation d’une éolienne à vitesse variable, nous considérons qu’elle dispose d’un modèle d’état stochastique, de dimension finie et en temps continu, linéaire à paramètre variant qui est la vitesse de rotation de la génératrice qui varie avec la vitesse de vent variable dans cette étude, donc nous nous sommes focalisé sur la conception d’une approche de diagnostic des défauts de la MADA à base d’observateurs de Kalman qui répondent à ces critères.

III.3.3 Notions sur les Filtres de Kalman

III.3.3.1 Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est un algorithme récursif, mis en parallèle avec le système observable en recopiant son modèle d’état. Il permet l’estimation des états internes non mesurables ou fortement bruités et biaisés du système étudié, à partir des données accessibles et qui sont les entrées et les sorties mesurées. Ce filtre a été publié la première fois par *Kalman* en 1960, dans son célèbre article proposant une solution récursive du problème de filtrage linéaire des mesures discrètes [Kalman, 1960]. Cet estimateur en boucle fermée se fait en deux étapes principales : l’étape d’estimation qui

visé à estimer l'état du système en utilisant un modèle semblable à celui du système à surveiller. L'étape de correction ou de mise à jour consiste à corriger ou minimiser l'erreur d'estimation qui n'est rien que la différence entre les états estimés et ceux mesurés, à l'aide d'un gain noté K qui doit être soigneusement choisi selon les propriétés de la dynamique et de robustesse de l'observateur.

Le filtre de Kalman s'utilise dans différents domaines technologiques relatifs au traitement du signal, radars, traitement d'images...etc. Il peut aussi être utilisé en météorologie et en océanographie, en navigation et en finance. L'algorithme du filtre de Kalman standard en temps discret, est défini comme suit :

Considérons le modèle d'état LPV, à temps discret du système observable, donné par :

$$\begin{cases} X(k+1) = A_d(p(k)) \cdot X(k) + B_d(p(k)) \cdot U(k) + W(k) \\ Y(k) = C_d(p(k)) \cdot X(k) + V(k) \end{cases} \quad \text{III.2}$$

Où :

$A_d(p(k)) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_d(p(k)) \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C_d(p(k)) \in \mathbb{R}^{p \times n}$ et $D_d \in \mathbb{R}^{p \times m}$ sont respectivement la matrice d'état, la matrice d'entrée ou de commande, la matrice de sortie ou d'observation et la matrice d'action directe,

$p(k)$ est le paramètre variant en fonction du temps, il peut être un vecteur, un scalaire ou une fonction polynomiale.

$X \in \mathbb{R}^n$, $Y \in \mathbb{R}^p$ et $U \in \mathbb{R}^m$ sont respectivement le vecteur d'état, le vecteur de sortie et le vecteur d'entrée ou de commande,

W et V sont des bruits gaussiens, respectivement du processus et de mesure. Ces bruits sont caractérisés par leurs matrices de covariance du bruit de processus Q et la matrice de covariance de bruit de mesure R , données respectivement par :

$$E[V V^T] = R \text{ et } E[W W^T] = Q \quad \text{III.3}$$

Avec : E est l'espérance mathématique,

De plus, ces bruits ont des valeurs moyennes nulles, définies par :

$$\begin{cases} E(W(k)) = 0 \\ E(V(k)) = 0 \end{cases} \quad \text{III.4}$$

Et ils sont autocorrélés : $\forall \tau \in \mathbb{Z}$

$$\begin{cases} E(W(k) W^T(k - \tau)) = Q \delta(\tau) \\ E(V(k) V^T(k - \tau)) = R \delta(\tau) \end{cases} \quad \text{III.5}$$

Où : $\delta(\tau)$ est la fonction d'impulsion de Dirac.

Les bruits ne sont pas corrélés entre eux (III.6) et aussi il n'y a pas de corrélation entre les bruits et les états du système (III.7) :

$$E(W(k) V^t(k - \tau)) = 0 \quad \text{III.6}$$

$$\begin{cases} E(W(k) X^t(k - \tau)) = 0 \\ E(V(k) X^t(k - \tau)) = 0 \end{cases} \quad \text{III.7}$$

L'algorithme du filtre de Kalman pour les systèmes LPV(Linéaires à paramètres variants) en temps discret, est constitué de deux étapes : [Shereen 2016]

-L'étape de prédiction : permettant d'estimer l'état du système à l'instant (k+1) à partir de l'état et les mesures calculés à l'instant (k). L'équation qui régit cette étape est donnée par :

$$\hat{X}(k + 1/k) = A_d(p(k)) \cdot \hat{X}(k/k) + B_d(p(k)) \cdot U(k) \quad \text{III.8}$$

Le vecteur de sortie du système est prédit comme suit :

$$\hat{Y}(k + 1/k) = C_d(p(k)) \cdot \hat{X}(k + 1/k) \quad \text{III.9}$$

Aussi, la matrice de covariance est calculée par l'équation suivante :

$$P(k + 1/k) = A_d(p(k)) \cdot P(k/k) \cdot A_d^t(p(k)) + Q(k) \quad \text{III.10}$$

-L'étape de mise à jour ou de correction : consiste à minimiser la variance d'erreur d'estimation des états, à l'aide d'un gain du filtre de Kalman noté K, en vue de corriger le vecteur d'état prédit dans la phase précédente par le vecteur de mesure. Le gain est donné par :

$$K(k + 1) = P(k + 1/k) \cdot C_d^T(p(k)) \cdot (C(p(k)) \cdot P(k + 1/k) \cdot C_d^T(p(k)) + R(k))^{-1} \quad \text{III.11}$$

Le vecteur d'état corrigé, estimé à l'instant (k + 1) s'exprime ainsi :

$$\hat{X}(k + 1 / k + 1) = \hat{X}(k + 1/k) + K(k + 1) \cdot [Y(k + 1) - C_d(p(k)) \cdot \hat{X}(k + 1/k)] \quad \text{III.12}$$

L'étape de correction vise aussi à mettre à jour la matrice de covariance selon l'équation suivante :

$$P(k + 1 / k + 1) = (I - K(k + 1) \cdot C_d(p(k))) \cdot P(k + 1/k) \quad \text{III.13}$$

Le diagramme qui résume le principe du filtre de Kalman classique est présenté sur la figure suivante :

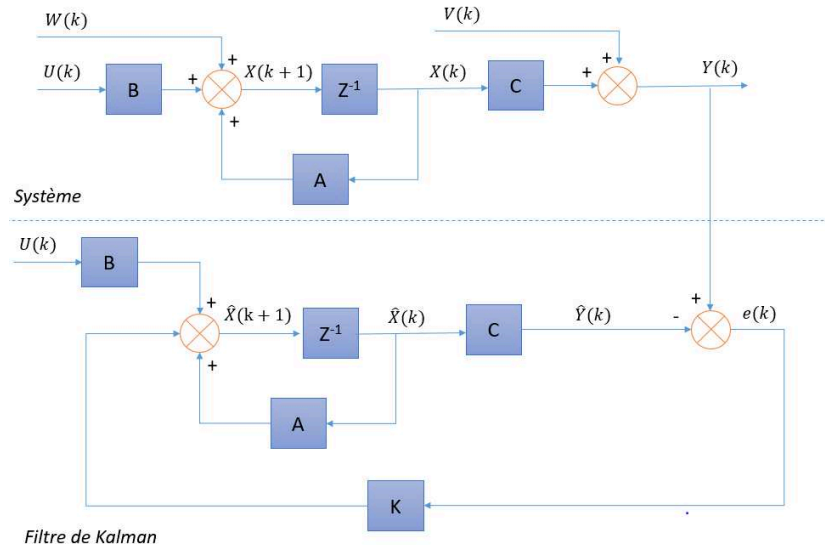


Figure III.10 Schéma-bloc du principe du filtre de Kalman

III.3.3.2 Filtres de Kalman non-linéaires

A- Filtre de Kalman Étendu (FKE)

Cet estimateur d'état est utilisé dans le cas où le modèle du système observable est non linéaire. Ce filtre permet de résoudre le problème de linéarisation des systèmes non linéaires autour d'un point de fonctionnement, en utilisant le développement de Tylor au premier ou au deuxième ordre [Simon 2006].

Nous considérons dans ce cas, le système dynamique non linéaire décrit ainsi :

$$X_k = f(X_{k-1}, U_k) + W_k \quad \text{III.14}$$

$$Y_k = h(X_{k-1}, U_k) + V_k \quad \text{III.15}$$

Avec :

W_k et V_k sont les bruits de processus et de mesures, de type blancs gaussiens additifs, de moyenne nulle et de matrices de covariance respectivement Q et R ,

f et h sont respectivement des fonctions d'état et d'observation non linéaires dérivables,

L'étape d'initialisation consiste à calculer le vecteur d'état initial à l'instant $k = 0$ et la matrice de covariance associée à l'état estimé initialement :

$$X(0|0) = X_0 \quad \text{III.16}$$

$$P(0|0) = P_0 \quad \text{III.17}$$

La phase de prédiction permet de calculer l'état du système et la matrice de covariance a priori :

$$\hat{X}_{k|k-1} = f(\hat{X}_{k-1|k-1}, U_{k-1}) \quad \text{III.18}$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} \cdot P_{k-1|k-1} \cdot F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad \text{III.19}$$

Le gain de Kalman étendu est exprimé par l'équation suivante :

$$K_k = P_{k|k-1} \cdot H_k^T \cdot S_k^{-1} \quad \text{III.20}$$

Où :

S_k est la covariance de l'innovation, donnée par :

$$S_k = H_k \cdot P_{k|k-1} \cdot H_k^T + R_k \quad \text{III.21}$$

La phase de mise à jour vise à estimer le vecteur d'état et la matrice de covariance à posteriori :

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k \cdot (Y_k - h(\hat{X}_{k|k-1}, 0)) \quad \text{III.22}$$

$$P_{k|k} = (I - K_k \cdot H_k) \cdot P_{k|k-1} \quad \text{III.23}$$

Avec :

F_k et H_k sont les matrices Jacobiennes, définies respectivement par :

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial X_k}(\hat{X}_{k-1|k-1}, U_k) \quad \text{III.24}$$

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial X_k}(\hat{X}_{k|k-1}, 0) \quad \text{III.25}$$

B- Filtre de Kalman non-Parfumé (UKF)

Le filtre de Kalman UKF est un estimateur qui a été proposé par *Julier* et *Uhlmann* [Julier 1997]. Il se différencie du filtre de Kalman étendu par le fait que son algorithme n'exige pas l'étape de linéarisation des fonctions non-linéaires de transition f et de mesure h . Il autorise donc de se

passer du problème de calcul fastidieux et délicat dans certains cas, des Jacobiennes du modèle. Son principe repose sur la transformation non parfumée (UT- Unscented Transformation), qui permet de calculer successivement la moyenne ainsi que la covariance à posteriori de l'état, en créant un nombre fini de points appelés « Sigma points », qui dépendent de la taille du vecteur d'état.

- Transformation Unscented (UT) :

Soit une variable aléatoire X de taille L , de moyenne \bar{X} et sa matrice de covariance P_x . Étant donné que $Y = f(X)$, avec Y est aussi une variable aléatoire dont nous souhaitons déterminer sa moyenne et sa matrice de covariance et f est la fonction non-linéaire, la transformation non linéaire (UT) consiste à sélectionner un échantillon de points de taille finie égale à $(2L + 1)$, nommés « Sigma-points ». Ces points notés $\{\chi_i\}_i^{2L+1}$ et pondérés par leurs poids $\{W_i\}_i^{2L+1}$, sont propagés par le modèle de prédiction non linéarisé et la moyenne et la covariance sont ensuite calculés par la moyenne pondérée. La phase suivante permet de calculer le vecteur de mesure prédit, la matrice de gain et la moyenne et la covariance à posteriori.

L'algorithme du filtre UKF est comme suit :

Étape 1. Initialisation : consiste à initialiser le vecteur d'état X_0 et la matrice de covariance d'erreur P_0 . Leurs valeurs initiales sont données par :

$$E[X_0] = \hat{X}_0 \quad \text{III.26}$$

$$E[(X(0) - \hat{X}(0|0))(X(0) - \hat{X}(0|0))^T] = P(0|0) \quad \text{III.27}$$

$$Q = E\{w_k w_k^T\}; R = \{V_k V_k^T\} \quad \text{III.28}$$

Avec Q et R sont respectivement les matrices de covariance des bruits d'état et de mesure.

Étape 2 : Calcul des Sigma points

Cette étape permet de calculer les sigma points χ_i et leurs poids de pondération W_i correspondants. Les Sigma points sont calculés par les équations suivantes :

$$\chi_{0,k} = \hat{x}_{k-1} \quad \text{III.29}$$

$$\chi_{i,k} = \hat{x}_{k-1} + (\sqrt{(L + \lambda) \cdot P_{k-1}})_i, i = 1, \dots, L \quad \text{III.30}$$

$$\chi_{i,k} = \hat{x}_{k-1} - (\sqrt{(L + \lambda) \cdot P_{k-1}})_i, i = L+1, \dots, 2L \quad \text{III.31}$$

Les poids de pondération des sigma points sont donnés par :

$$W_0^{(m)} = \lambda / (L + \lambda) \quad \text{III.32}$$

$$W_0^{(c)} = \lambda / (L + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \quad \text{III.33}$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = 1 / \{2(L + \lambda)\} , i = L+1, \dots, 2L \quad \text{III.34}$$

Avec :

λ , β et α sont les paramètres de configuration, λ est exprimé ainsi :

$$\lambda = \alpha^2 \cdot (L + K) - L \quad \text{III.35}$$

α détermine la distribution des sigma points autour de la moyenne. Ce paramètre vaut généralement un petit nombre positif (exemple $1 \cdot 10^{-3}$), β est le paramètre de répartition de l'état, il vaut 2 pour la répartition gaussienne et zéro pour une seule variable d'état, K est le paramètre d'échelonnage secondaire souvent égal à $K=0$.

$(\sqrt{(L + \lambda) \cdot P_{k-1}})_i$ est la $i^{\text{ème}}$ colonne de la racine carrée de la matrice $((L + \lambda) \cdot P_{k-1})$ par l'utilisation de la décomposition de Cholesky.

Étape 3 : Phase de prédiction

Lors de cette étape, le filtre prédit l'état du système $\hat{x}_{k/k-1}$ et la matrice de covariance d'erreur d'état $P_{k/k-1}$, en propageant les sigma points χ_{k-1} par la fonction de transition non-linéaire f . Les équations de la phase de prédiction sont présentées ci-dessous :

- Propagation des Sigma-points :

$$\chi_{i,k/k-1} = f(\chi_{i,k-1}) \quad \text{III.36}$$

- Estimation à priori de l'état du système :

$$\hat{x}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \cdot \chi_{i,k/k-1} \quad \text{III.37}$$

- Calcul de la matrice de covariance d'erreur d'état à priori :

$$P_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \cdot (\chi_{i,k} - \hat{x}_{k/k-1}) \cdot (\chi_{i,k} - \hat{x}_{k/k-1})^T + Q_{k-1} \quad \text{III.38}$$

Étape 4 : Phase de Mise à jour

En vue de mettre à jour l'état du système $\hat{x}_{k/k}$ ainsi que sa matrice de covariance de bruit $P_{k/k}$, les sigma points χ_i sont propagés selon la fonction non-linéaire d'observation h et donc de nouveaux sigma points sont obtenus :

$$Y_{i,k/k-1} = h(\chi_{i,k-1}) \quad \text{III.39}$$

Le vecteur de mesures est écrit ainsi :

$$\hat{y}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \cdot Y_{i,k/k-1} \quad \text{III.40}$$

Le gain de Kalman UKF est donné par :

$$K_k = P_{\hat{x}_k, \hat{y}_k} \cdot P_{\hat{y}_k, \hat{y}_k}^{-1} \quad \text{III.41}$$

Avec :

$P_{\hat{x}_k, \hat{y}_k}$ est la matrice de covariance des états et des mesures, exprimée par :

$$P_{\hat{x}_k, \hat{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \cdot (\chi_{i,k/k-1} - \hat{x}_{k/k-1}) \cdot (Y_{i,k/k-1} - \hat{y}_{k/k-1})^T \quad \text{III.42}$$

$P_{\hat{y}_k, \hat{y}_k}$ est la matrice de covariance d'erreur des mesures :

$$P_{\hat{y}_k, \hat{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \cdot (Y_{i,k/k-1} - \hat{y}_{k/k-1}) \cdot (Y_{i,k/k-1} - \hat{y}_{k/k-1})^T \quad \text{III.43}$$

La mise à jour des états du système est donnée par :

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + K_k \cdot (y_k - \hat{y}_{k/k-1}) \quad \text{III.44}$$

Et la mise à jour de la matrice de covariance des bruits de mesures est exprimée ainsi :

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - K_k \cdot P_{\hat{y}_k, \hat{y}_k} \cdot K_k^T \quad \text{III.45}$$

III.4 Approches de diagnostic des défauts de la MADA à l'aide des Filtrés de Kalman

En vue de concevoir une approche de diagnostic basée sur les filtres de Kalman, des défauts de la MADA d'une éolienne fonctionnant à vitesse du vent variable et afin de surveiller en continu et en temps réel les altérations pouvant affecter les variables d'état du modèle de la machine et aussi pour obtenir la forme sinusoïdale des grandeurs électriques (tensions et courants). Nous avons choisi dans un premier temps d'écrire en équations simplifiées, le modèle d'état de la MADA dans le repère stationnaire de Concordia, noté (α, β) .

III.4.1 Modèle de la MADA dans le repère stationnaire (α, β) , lié au champ tournant

En se basant sur les équations (II.53-II.54-II.55-II.56 et II.57), nous pouvons représenter le système MADA dans le repère de Park, lié au champ tournant, sous forme de la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\omega_s, \omega(t)) \cdot x(t) + B \cdot u(t) \\ y(t) = C \cdot x(t) \end{cases} \quad \text{III.46}$$

$\omega(t)$ est la vitesse angulaire de la machine en $[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$,

ω_s est la pulsation statorique en $[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$ considérée constante dans cette étude : $\omega_s = 2\pi f_s$ avec $f_s = 50 \text{ Hz}$ (fréquence du réseau électrique).

$x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état du système : $x(t) = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T$,

Avec : i_{ds}, i_{qs} sont les courants statoriques dans le repère de Park (d, q) et i_{dr}, i_{qr} sont les courants rotoriques dans le même repère.

$u(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur d'entrée du système : $u(t) = [v_{ds} \quad v_{qs} \quad v_{dr} \quad v_{qr}]^T$

Avec : v_{ds}, v_{qs} sont les tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) et v_{dr}, v_{qr} sont les tensions rotoriques dans le même repère.

$y(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur de sortie du système : $y(t) = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T$

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ et $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ sont respectivement la matrice d'état, la matrice d'entrée et la matrice d'observation.

Les éléments du vecteur d'état sont écrits sous forme des équations explicites suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}(t)}{dt} = -a_1 \cdot i_{ds}(t) + (a' \omega(t) + \omega_s) \cdot i_{qs}(t) + a_3 \cdot i_{dr}(t) + a_5 \cdot \omega(t) \cdot i_{qr}(t) + b_1 \cdot v_{ds}(t) - b_3 \cdot v_{dr}(t) \\ \frac{di_{qs}(t)}{dt} = -(a' \omega(t) + \omega_s) \cdot i_{ds}(t) - a_1 \cdot i_{qs}(t) - a_5 \cdot \omega(t) \cdot i_{dr}(t) + a_3 \cdot i_{qr}(t) + b_1 \cdot v_{qs}(t) - b_3 \cdot v_{qr}(t) \\ \frac{di_{dr}(t)}{dt} = a_4 \cdot i_{ds}(t) - a_6 \cdot \omega(t) \cdot i_{qs}(t) - a_2 \cdot i_{dr}(t) + \left(\omega_s - \frac{\omega(t)}{\sigma} \right) \cdot i_{qr}(t) - b_3 \cdot v_{ds}(t) + b_2 \cdot v_{dr}(t) \\ \frac{di_{qr}(t)}{dt} = a_6 \cdot \omega(t) \cdot i_{ds}(t) + a_4 \cdot i_{qs}(t) - \left(\omega_s - \frac{\omega(t)}{\sigma} \right) \cdot i_{dr}(t) - a_2 \cdot i_{qr}(t) - b_3 \cdot v_{qs}(t) + b_2 \cdot v_{qr}(t) \end{cases} \quad \text{III.47}$$

Avec :

$$\begin{aligned} a &= (1 - \sigma) / \sigma, \quad a_1 = R_s / (\sigma \cdot L_s) \quad , \quad a_2 = R_r / (\sigma \cdot L_r) \quad , \quad a_3 = (R_r \cdot M) / (\sigma \cdot L_s \cdot L_r) \quad , \\ a_4 &= (R_s \cdot M) / (\sigma \cdot L_s \cdot L_r) \quad , \quad a_5 = M / (\sigma \cdot L_s) \quad , \quad a_6 = M / (\sigma \cdot L_r) \quad , \quad b_1 = 1 / (\sigma \cdot L_s) \quad , \\ b_2 &= 1 / (\sigma \cdot L_r) \quad b_3 = M / (\sigma \cdot L_s \cdot L_r) \quad , \quad \sigma = 1 - M^2 / (L_s \cdot L_r) \text{ est le coefficient de Blondel.} \end{aligned}$$

En réécrivant le système d'équations (II.61) sous la représentation d'état (II.60), nous obtenons :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}(t) \\ i_{qs}(t) \\ i_{dr}(t) \\ i_{qr}(t) \end{bmatrix} = A(\omega_s, \omega(t)) \cdot \begin{bmatrix} i_{ds}(t) \\ i_{qs}(t) \\ i_{dr}(t) \\ i_{qr}(t) \end{bmatrix} + [B] \cdot \begin{bmatrix} v_{ds}(t) \\ v_{qs}(t) \\ v_{dr}(t) \\ v_{qr}(t) \end{bmatrix} \quad \text{III.48}$$

Avec :

$$A(\omega_s, \omega(t)) = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma \cdot L_s} & \left(\frac{1 - \sigma}{\sigma} \cdot \omega(t) + \omega_s \right) & \frac{M \cdot R_r}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & \frac{M}{\sigma \cdot L_s} \cdot \omega(t) \\ -\left(\frac{1 - \sigma}{\sigma} \cdot \omega(t) + \omega_s \right) & \frac{-R_s}{\sigma \cdot L_s} & -\frac{M}{\sigma \cdot L_s} \cdot \omega(t) & \frac{M \cdot R_r}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ \frac{M \cdot R_s}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & -\frac{M}{\sigma \cdot L_r} \cdot \omega(t) & \frac{-R_r}{\sigma \cdot L_r} & \left(\omega_s - \frac{\omega(t)}{\sigma} \right) \\ \frac{M}{\sigma \cdot L_r} \cdot \omega(t) & \frac{M \cdot R_s}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & -\left(\omega_s - \frac{\omega(t)}{\sigma} \right) & \frac{-R_r}{\sigma \cdot L_r} \end{bmatrix} \quad \text{III.49}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ -\frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma \cdot L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \end{bmatrix} \quad \text{III.50}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{III.51}$$

En observant les éléments de la matrice d'état A , nous remarquons que cette matrice possède une partie constante, contenant la pulsation statorique ω_s imposée par la fréquence du réseau électrique et les paramètres électriques de la machine. La partie variable, correspond à la vitesse angulaire du rotor de la machine notée ω . Ce paramètre varie en fonction de la vitesse variable du vent et elle est considérée comme étant un paramètre variant dans le temps. Afin de mieux décrire la dynamique du système de la MADA, le paramètre variable est mis à part des paramètres constants du système dans la matrice d'état A . Alors, le modèle d'état de la MADA, présenté dans l'équation (III.46) est un modèle d'état linéaire à paramètre variant (LPV).

Les systèmes linéaires à paramètre(s) variant(s) (LPV) constituent une classe particulière des systèmes qui, pour chaque valeur fixe du vecteur des paramètres variants $p(t)$, se comportent comme étant des systèmes linéaires à temps invariant (LTI). Le modèle LPV général est représenté sous la forme d'une représentation d'état, comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(p(t)) & B(p(t)) \\ C(p(t)) & D(p(t)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad \text{III.52}$$

D'Où : $p(t)$ est le vecteur des paramètres variant en fonction du temps. Dans notre cas, seule la matrice d'état A contient un unique paramètre variant, tandis que les matrices B et C ont des éléments constants. Par conséquent, la matrice d'état A peut-être réécrite comme suit :

La matrice d'état A est réécrite comme suit :

$$A = A_0 + \omega(t) \cdot A_1 \quad \text{III.53}$$

Avec :

A_0 et A_1 sont des matrices constantes, données par :

$$A_0 = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma \cdot L_s} & \omega_s & \frac{M \cdot R_r}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 \\ -\omega_s & \frac{-R_s}{\sigma \cdot L_s} & 0 & \frac{M \cdot R_r}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ \frac{M \cdot R_s}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 & \frac{-R_r}{\sigma \cdot L_r} & \omega_s \\ 0 & \frac{M \cdot R_s}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & -\omega_s & \frac{-R_r}{\sigma \cdot L_r} \end{bmatrix} \quad \text{III.54}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-\sigma)}{\sigma} & 0 & \frac{M}{\sigma \cdot L_s} \\ -\frac{(1-\sigma)}{\sigma} & 0 & -\frac{M}{\sigma \cdot L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma \cdot L_r} & 0 & -\frac{1}{\sigma} \\ \frac{M}{\sigma \cdot L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{III.55}$$

Ensuite pour passer au repère stationnaire (α, β), il suffit de faire une rotation inverse ($[R]^{-1}$), selon l'équation suivante :

$$[X_{\alpha\beta 0}] = [R]^{-1} \cdot [X_{dq0}] \quad \text{III.56}$$

$$[R] = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{III.57}$$

θ est l'angle électrique entre le stator et le rotor.

Donc, l'équation (II.62) devient :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \\ i_{r\alpha}(t) \\ i_{r\beta}(t) \end{bmatrix} = (A_0 + \omega(t) \cdot A) \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \\ i_{r\alpha}(t) \\ i_{r\beta}(t) \end{bmatrix} + [B] \cdot \begin{bmatrix} v_{s\alpha}(t) \\ v_{s\beta}(t) \\ v_{r\alpha}(t) \\ v_{r\beta}(t) \end{bmatrix} \quad \text{III.58}$$

Pour pouvoir implémenter le système étudié et sa procédure de diagnostic à base des observateurs de Kalman sur un calculateur numérique ou un microprocesseur, une étape de discrétisation du modèle d'état de la MADA à temps continu, est nécessaire. La discrétisation est la transposition d'un état continu (modèle, équation, fonction) en un équivalent discret.

La version discrète du modèle d'état de la MADA dans le référentiel (α, β), exprimé par l'équation (III.58), est obtenue en utilisant la méthode de bloqueur d'ordre zéro (Zero-Order-Hold 'ZOH'). La commande Matlab '**c2d**' permet de convertir un modèle d'état à temps continu en un modèle d'état à temps discret, en employant la syntaxe suivante :

```
>> [Ad, Bd, Cd, Dd] = c2d(A, B, C, D, Te, 'zoh')
```

Avec :

A_d, B_d, C_d, D_d sont respectivement la matrices discrétisées d'état, d'entrée, de sortie et d'action directe. La matrice D dans notre cas est la matrice nulle de taille (4X4).

T_e est le temps d'échantillonnage, il a été choisi de façon à conserver le maximum d'informations du modèle d'état continu. Dans notre étude, le temps d'échantillonnage est très petit et égal à $[10^{-6}\text{s}]$.

'zoh' est la méthode de discrétisation, elle suppose que les entrées de commande sont constantes par morceaux sur la durée d'échantillonnage T_e .

Alors, le modèle d'état à temps continu de la MADA, exprimé dans le référentiel (α, β) et donné par l'équation (III. 58), s'écrit sous la forme discrète suivante :

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d \cdot x(k) + B_d \cdot u(k) \\ y(k) = C_d \cdot x(k) \end{cases} \quad \text{III.59}$$

L'ordre de l'erreur de discrétisation du système est donné par la figure suivante :

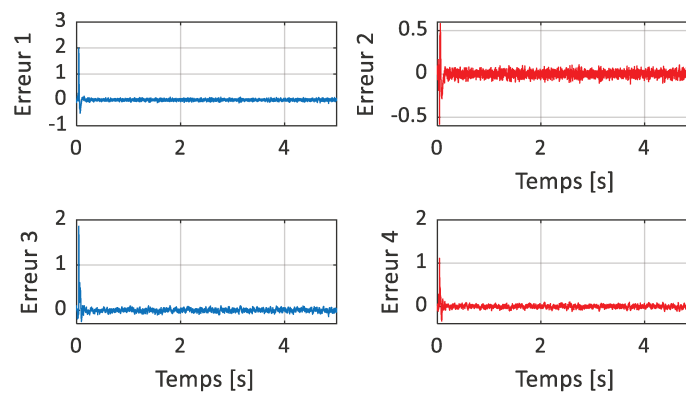


Figure III.11 Erreurs de discrétisation du modèle continu de la MADA

III.4.2 Diagnostic des défauts capteurs de courant la MADA

Après avoir écrit le modèle d'état linéaire à paramètre variant de la MADA dans le repère (α, β) lié au champ statorique tournant, nous aborderons dans cette section la procédure de diagnostic des défauts de la machine par l'outil de filtre de Kalman.

Selon leur localisation, les défauts affectant la MADA, pouvant survenir au niveau des capteurs, des actionneurs ou dans le système lui-même. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux diagnostic des défauts capteurs.

Le défaut capteur considéré dans notre étude, est de type additionnel et il est modélisé en ajoutant un terme f_c dans l'équation de mesure, d'où f_c est donné par:

$$f_c = [f_{c1} \quad f_{c2} \quad f_{c3} \quad f_{c4}]^T \quad \text{III.60}$$

Avec :

f_{c1} , f_{c2} , f_{c3} et f_{c4} sont les défauts affectant les capteurs mesurant respectivement le courant $i_{s\alpha}$, le courant $i_{s\beta}$, le courant $i_{r\alpha}$ et le courant $i_{r\beta}$.

La représentation d'état du système observé est réécrite ainsi :

$$\begin{cases} x(k+1) = (A_0 + A_1 \cdot \omega(k)) \cdot x(k) + B \cdot u(k) + W(k) \\ y(k) = C \cdot x(k) + D_c \cdot f_c(k) + V(k) \end{cases} \quad \text{III.61}$$

D'où : D_c est la matrice du défaut capteur.

Les travaux récents sur l'estimation d'état pour les systèmes du type LPV reposent principalement sur l'utilisation des approches non linéaires, comme par exemple l'application du filtre de Kalman étendu (EKF) ou le filtre de Kalman (UKF). Cependant, ces approches non linéaires présentent une complexité de mise en œuvre. Donc un observateur de Kalman du type LPV, qui tient compte dans son algorithme de la variabilité de la matrice d'état A est utilisé dans cette partie. Plusieurs travaux ont été réalisés sur la conception des observateurs du type LPV, comme dans [Szaszzi 2005], [Grenaille 2008], [Armeni 2009], [Casavola 2007], [Henry 2009].

Alors, le filtre de Kalman classique pour les systèmes linéaires à temps invariant (LTI), décrit dans la section (III.3.3.1) est quasiment modifié pour le modèle d'état LPV de la MADA présenté ci-dessus. Dans notre étude, seule la matrice d'état A est variable, alors que les autres matrices B et C sont constantes, l'algorithme du filtre de Kalman utilisé est inspiré des travaux présentés dans [Shereen 2016].

Le filtre de Kalman du type LPV est utilisé pour la génération des résidus. Le schéma ci-dessous présente les étapes de la procédure appliquée pour de diagnostic des défauts capteurs de la MADA d'une éolienne :

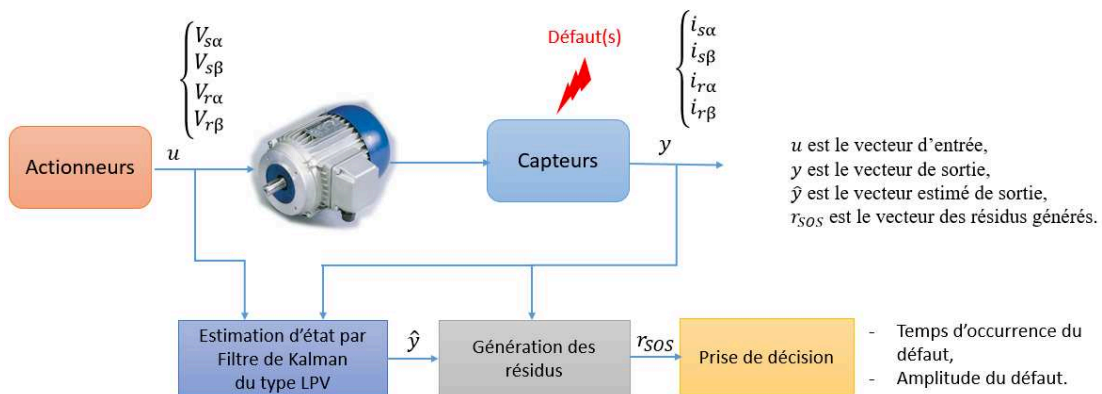


Figure III.12 Structure de l'approche de diagnostic des défauts capteurs de la MADA d'une éolienne

a) Reconstruction d'état du système par le filtre de Kalman classique

En appliquant l'algorithme de Kalman du type LPV, nous parvenons à reconstruire les états internes de la machine, correspondants aux courants délivrés en sortie de la machine, selon le schéma suivant :

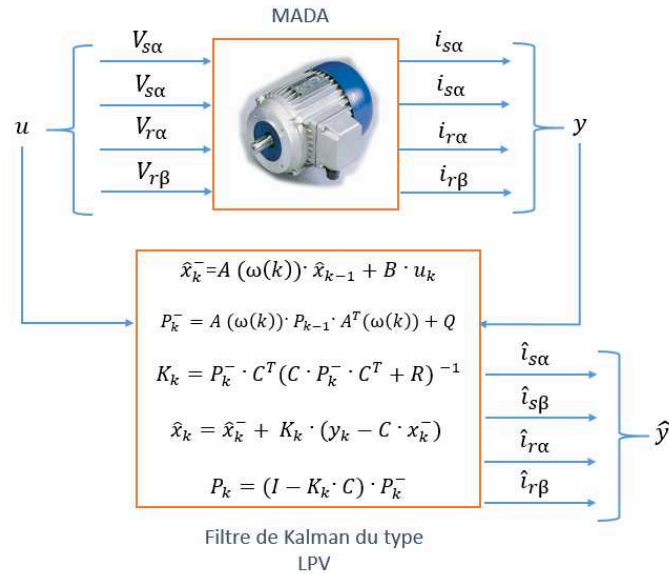


Figure III.13 Reconstruction des états de la MADA par le filtre de Kalman classique

Une étape de vérification de l'observabilité du système LPV est nécessaire. Cela se réalise par le calcul du rang de la matrice d'observabilité de la même manière que pour les systèmes LTI (Linear Time Invariant) [Sename Gipsa-Lab 2016]. La matrice d'observabilité est donnée par l'expression suivante :

$$S_0 = [C \quad C \cdot A(\omega) \quad C \cdot A^2(\omega) \quad C \cdot A^3(\omega) \quad \dots \dots \dots \quad C \cdot A^{n-1}(\omega)]^T \quad \text{III.62}$$

Avec :

n est la taille du vecteur d'état du système observé. Le système est observable lorsque :

Pour le modèle LPV de la MADA, nous avons visualisé l'observabilité du système en fonction du temps. La figure suivante présente le résultat du calcul du rang de la matrice d'observabilité (III.62) durant le temps de simulation :

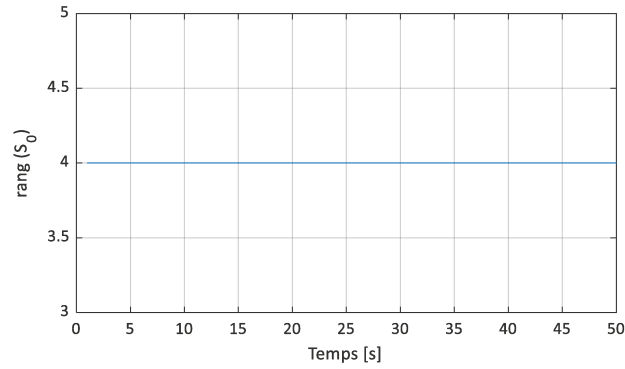


Figure III.14 Rang de la matrice d'observabilité

Le nombre des états du modèle du système est égal à 4, ce qui correspond à la taille du vecteur d'état du système donc le système est observable.

Pour se rapprocher du cas réel, nous avons supposé l'existence de bruits additifs centrés de type gaussien de variance 1 de moyenne 0 et d'amplitude 1 ajoutés à chacune des sorties. Donc, les résultats d'estimation des courants de la MADA par le filtre de Kalman du type LPV et les valeurs de courants issus de la simulation du modèle LPV de la machine, sont présentés sur la figure suivante :

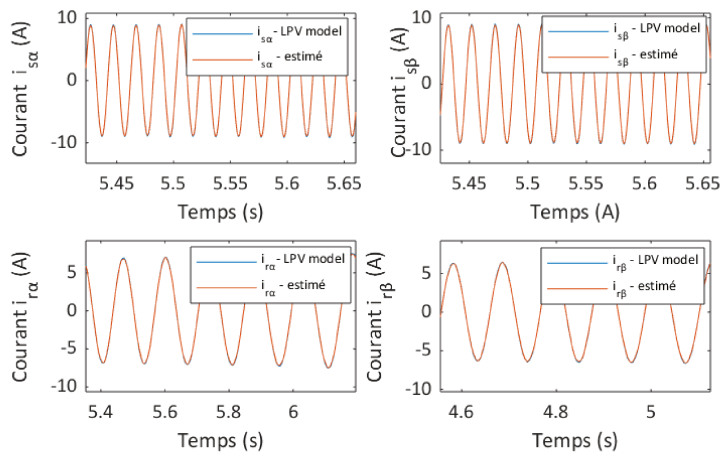


Figure III.15 Zoom sur les courants de la MADA issus du modèle LPV et leurs estimations

Aussi, les erreurs d'estimation sont montrées sur la figure ci-après :

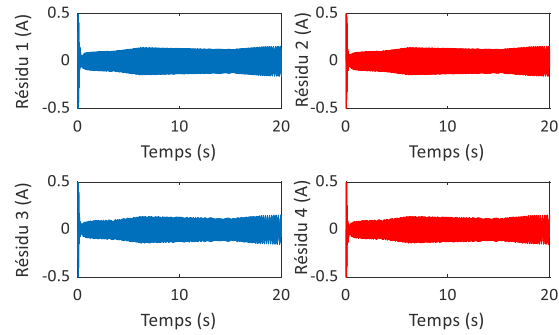


Figure III.16 Évolution des erreurs d'estimation ou de résidus en fonctionnement sain

Même en absence des défauts, nous remarquons que les valeurs des erreurs d'estimation, ne sont pas statiquement nulles. Cela est dû aux bruits gaussiens blancs que nous avons ajouté aux mesures pour simuler le fonctionnement réel de la machine.

- **Détection et localisation des défauts capteurs**

Nous avons considéré dans un premier temps l'apparition d'un seul défaut capteur de courant de la MADA. Il s'agit d'un défaut additif noté f_1 , apparaissant à l'instant $t_1 = 1$ [s] et disparaissant à l'instant $t_2 = 5$ [s], avec une amplitude constante de 6 [A] par rapport à la valeur nominale du courant. Ce défaut affecte le capteur mesurant le courant $i_{s\alpha}$ correspondant à la sortie y_1 , les autres sorties y_2 , y_3 et y_4 sont supposées sans défauts.

- **Structure SOS :**

Considérant ce scénario de défaut, le Schéma d'Observateur Simplifié (*Simplified Observer Scheme SOS*) est utilisé pour générer les résidus. Cette structure consiste à mettre en place un unique observateur de Kalman du type LPV, la figure suivante présente le principe de base :

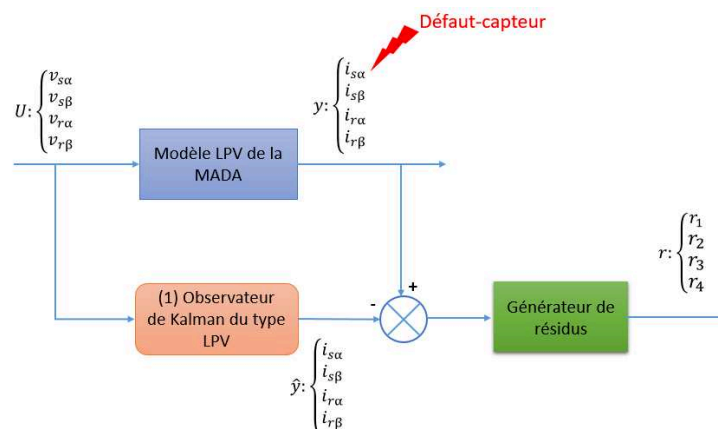


Figure III.17 Schéma SOS pour le diagnostic du défaut capteur de la MADA

Les signaux de résidus obtenus par l'observateur de Kalman unique, sont présentés sur la figure suivante :

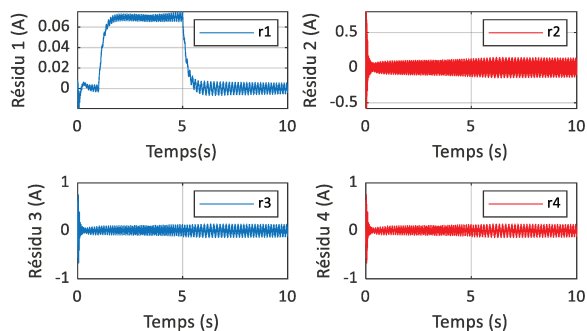


Figure III.18 Résidus du premier scénario de défaut capteur

Nous remarquons que le premier résidu r_1 signale la présence du défaut capteur f_{c1} , tandis que les autres résidus r_2 , r_3 et r_4 sont nuls.

Dans un second temps, nous allons considérer deux défauts capteurs simultanés de type additifs, affectant les sorties y_1 , et y_3 de la génératrice, correspondants aux mesures des courants $i_{s\alpha}$ et $i_{r\alpha}$. Les autres sorties y_2 , et y_4 sont supposées saines. Les deux défauts

f_{c1} et f_{c3} sont introduits à l'instant $t_i = 1s$ et disparaissent à l'instant $t_f = 5 [s]$, d'amplitude constante égale à 6 [A] par rapport à la valeur nominale des courants.

La figure suivante montre les résidus générés par l'observateur de Kalman unique, à noter : r_1 , r_2 , r_3 et r_4 .

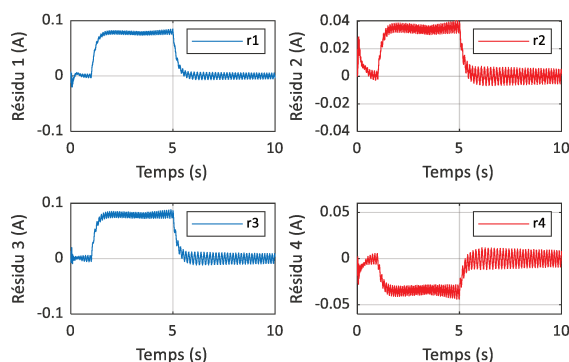


Figure III.19 Signaux des résidus des défauts capteurs multiples et simultanés

Nous constatons que tous les résidus sont affectés par les deux défauts f_{c1} et f_{c3} . Donc, nous pouvons conclure qu'une interaction existe entre les sorties du système. La structure d'observateur simplifié (SOS) ne permet pas de localiser le capteur défaillant. Par conséquent, une structure DOS est utilisée pour détecter et localiser les défauts capteurs, multiples et simultanés.

- **Structure DOS :**

La figure ci-dessous illustre la structure DOS, utilisant les observateurs de Kalman dans le but de générer les signaux de résidus pour le cas des défauts capteurs simultanés et multiples de la génératrice [Chafouk 2015] :

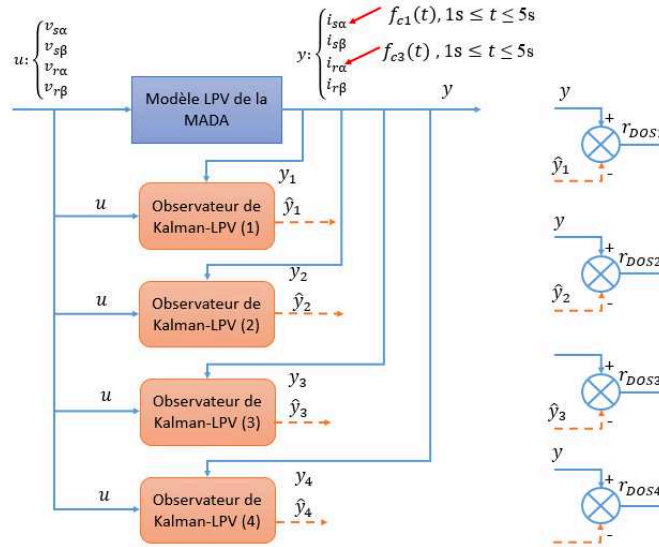


Figure III.20 Structure DOS pour le diagnostic des défauts capteurs de la MADA

Sur ce schéma DOS, le nombre d'observateurs de Kalman est égal au nombre de sorties de la MADA. Chaque observateur est piloté par toutes les entrées du système et par une seule sortie ou mesure, il reconstruit tous les états du système, correspondants aux sorties dans notre cas, à partir d'une seule sortie et toutes les entrées du système. Il est donc primordial de vérifier l'observabilité du système par chaque sortie ; cela revient à vérifier que pour chaque pair $\{A, C_i\}$, l'état du système est observable ; avec $i = \{1,2,3,4\}$, A est la matrice d'état du système et la matrice de sortie C est écrite comme suit : $C = [C_1^T \ C_2^T \ C_3^T \ C_4^T]$.

\hat{y}_i est le vecteur des sorties estimées par chaque observateur, exprimé par :

$$\hat{y}_i = [\hat{y}_{i,1} \ \hat{y}_{i,2} \ \hat{y}_{i,3} \ \hat{y}_{i,4}]^T, i = \{1,2,3,4\} \quad \text{III.63}$$

De ce fait, chaque résidu r_i est un vecteur composé de 4 éléments et qui est écrit ainsi :

$$r_i = [r_{i,1} \ r_{i,2} \ r_{i,3} \ r_{i,4}], i = \{1,2,3,4\} \quad \text{III.64}$$

Prenons comme exemple, l'observateur de Kalman (1), nous avons donc :

$$r_1 = [r_{1,1} \ r_{1,2} \ r_{1,3} \ r_{1,4}] \quad \text{III.65}$$

Les éléments du vecteur des résidus r_1 est donné par :

$$\begin{aligned} r_{1,1} &= y_1 - \hat{y}_{1,1} \\ r_{1,2} &= y_2 - \hat{y}_{1,2} \\ r_{1,3} &= y_3 - \hat{y}_{1,3} \\ r_{1,4} &= y_4 - \hat{y}_{1,4} \end{aligned} \quad \text{III.66}$$

Avec :

$\hat{y}_{1,1}$, $\hat{y}_{1,2}$, $\hat{y}_{1,3}$ et $\hat{y}_{1,4}$ sont respectivement les sorties estimées par l'observateur de Kalman linéaire, y_1 , y_2 , y_3 et y_4 sont les sorties données par le modèle LPV de la MADA.

Nous pouvons rassembler les résidus des 4 observateurs dans une matrice qu'on note r_{DOS} et qu'on écrit comme suit :

$$r_{DOS} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & r_{1,4} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & r_{2,4} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & r_{3,4} \\ r_{4,1} & r_{4,2} & r_{4,3} & r_{4,4} \end{bmatrix} \quad \text{III.67}$$

Considérons le scénario des défauts capteurs multiples et simultanés $f_{c1}(t)$ et $f_{c3}(t)$, nous présentons ci-après les résidus obtenus par chaque observateur de Kalman structurés selon le schéma DOS :

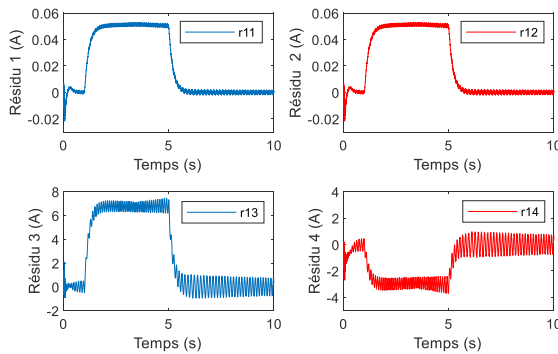


Figure III.21 Les résidus de l'observateur de Kalman (1)

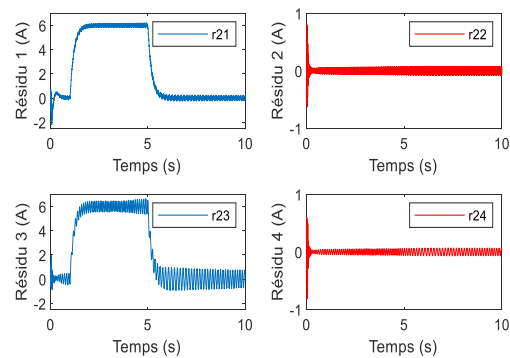


Figure III.22 Les résidus de l'observateur de Kalman (2)

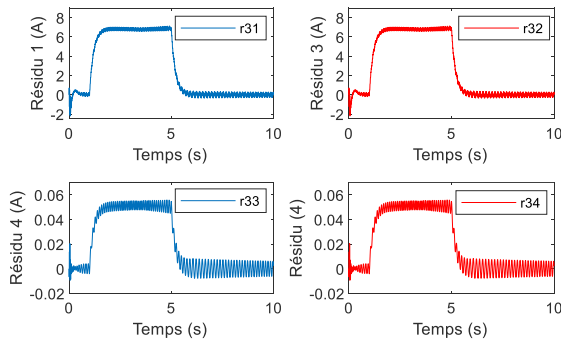


Figure III.23 Les résidus de l'observateur de Kalman (3)

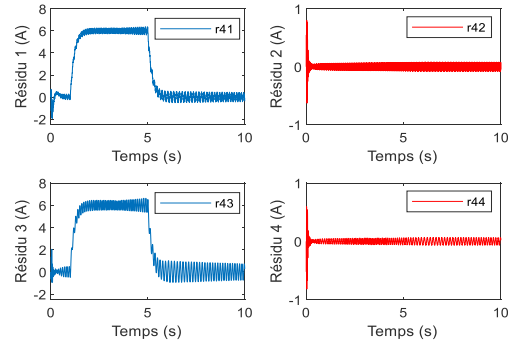


Figure III.24 Les résidus de l'observateur de Kalman (4)

En observant l'ensemble de ces résidus, nous pouvons conclure que les observateurs de Kalman (1) et (3), pilotés par les sorties défaillantes y_1 et y_3 , fournissent de mauvaises estimations des courants de la MADA et donc les résidus de ces deux observateurs ne peuvent pas être utilisés pour localiser les deux capteurs en défaut. Tandis que, les observateurs de Kalman (2) et (4), pilotés par les sorties sans défaut y_2 et y_4 , fournissent de bonnes estimations des sorties du système et nous pouvons par conséquent, se baser sur leurs résidus, pour la localisation des capteurs en défaut. Cette redondance analytique offerte, par l'utilisation du schéma DOS, permet de confirmer le fait que les capteurs (1) et (3) sont en défaut et les capteurs (2) et (4) sont sans défauts.

- **Structure GOS :**

Dans cette structure, il est question de concevoir un certain nombre d'observateurs où chacun d'entre eux est piloté par toutes les entrées et une seule sortie. Si un défaut apparaît alors, toutes les estimations des variables d'état seront erronées sauf celles issues de l'observateur insensible à ce défaut. Ce schéma offre plus de degrés de liberté pour la conception de l'observateur et permet d'augmenter la robustesse.

Pour le cas des défauts des capteurs de courant de la MADA, simultanés et multiples, une deuxième structure appelée la structure d'observateurs généralisés (GOS). Ce schéma peut être illustré par la figure suivante :

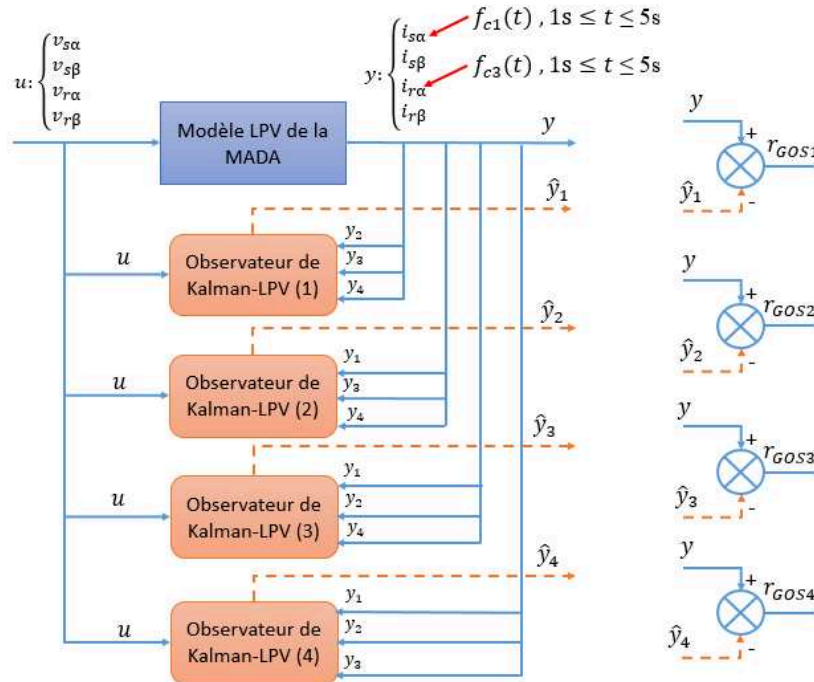


Figure III.25 la structure GOS pour le diagnostic des défauts capteurs de courant de la MADA

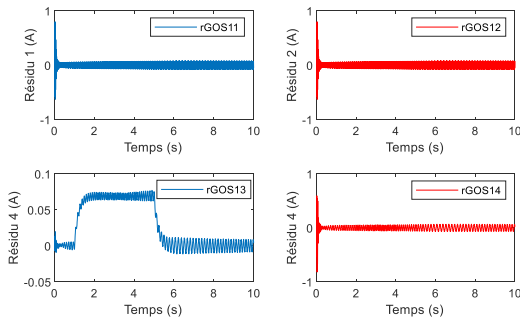


Figure III.26 Les résidus de l'observateur de Kalman (1)

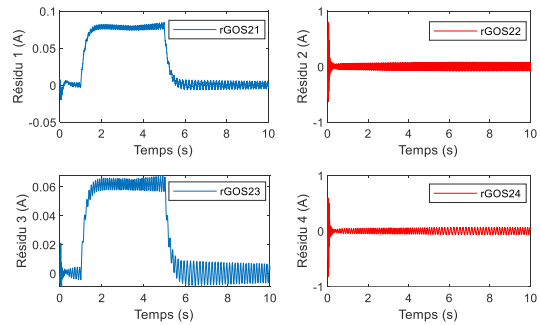


Figure III.27 Les résidus de l'observateur de Kalman (2)

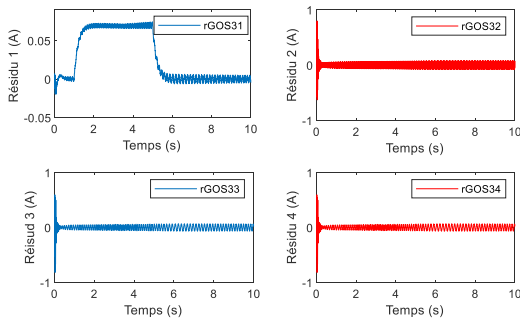


Figure III.28 Les résidus de l'observateur de Kalman (3)

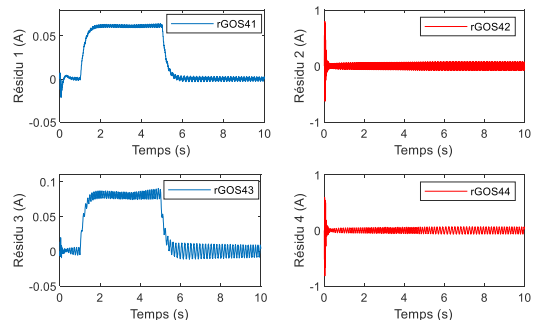


Figure III.29 Les résidus de l'observateur de Kalman (4)

Cette approche est intéressante pour la détection des défauts capteurs pour un système linéaire.

- **Isolation des défauts :**

Lors de l'étape de prise de décision, il est nécessaire de différencier les défauts capteurs de courant des bruits de mesure et c'est ainsi que les fausses alarmes sont évitées. En plus, les temps d'occurrence et de disparition du défaut capteur sont précisément déterminés. Alors, un test statistique permettant de détecter le saut positif ou négatif de la moyenne du signal résidu est appliqué, dans notre étude, nous avons utilisé dans un premier temps le test statistique Page-Hinkley (P-H).

- **Test de Page-Hinkley:**

Ce test est basé sur le principe de la détection d'un changement brusque de la moyenne d'un signal gaussien. Nous considérons que l'amplitude du saut n'est pas connue ce qui nécessite la mise en parallèle de deux tests similaires [BOUFERTELLA 2018]

Avec :

- v , amplitude du saut
- n , le nombre d'échantillons $\{e(k), k = 1, \dots, n\}$
- μ , la moyenne du résidu
- μ_0 , la moyenne du résidu en l'absence de défaut
- μ_1 , la moyenne du résidu en présence de défaut
- ξ l'amplitude minimale du saut à détecter

Pour détecter un saut positif, nous calculons alors U_n tel que :

$$U_n = \sum_{k=1}^n (e(k) - \mu_0 - \frac{\xi}{2}) \quad \text{III.68}$$

$$m_n = \min_{0 < k < n} (U_k) \quad \text{III.69}$$

L'augmentation de la moyenne est détectée lorsque :

$$U_{n-m_n} > \Delta \quad \text{III.70}$$

Où :

Δ est le seuil de détection.

Pour détecter un saut négatif, nous calculons alors T_n tel que :

$$T_n = \sum_{k=1}^n (e(k) - \mu_0 + \frac{\xi}{2}) \quad \text{III.71}$$

$$M_n = \min_{0 < k < n} (T_k) \quad \text{III.72}$$

La diminution de la moyenne est détectée lorsque :

$$M_n - T_n > \Delta \quad \text{III.73}$$

$$M_n = \min_{0 < k < n} (T_k) \quad \text{III.74}$$

Sous forme récursive, l'écriture de la relation pour le saut positif devient :

$$U_n = U_{n-1} + e_n - \mu_0 - \frac{\xi}{2} \quad \text{III.75}$$

$$m_n = \min(m_{n-1}, U_n) \quad \text{III.76}$$

Le seuil de détection Δ est fixé par apprentissage. Une valeur initiale de ce seuil peut être calculée par :

$$\Delta = \frac{2h}{p} \quad \text{III.77}$$

Où h pour des distributions normales, est égal à 2 et p est la valeur du saut et ξ est exprimée en nombre d'écart-type du signal :

$$\xi = p\sigma \quad \text{III.78}$$

D'où:

$$\Delta = \frac{4\sigma}{\xi} \quad \text{III.79}$$

La phase d'isolation du défaut de capteur, selon le premier scénario de défaut, est réalisée par le moyen de l'analyse des déterminants obtenus par l'application du test Page-Hinkley sur les signaux de résidus, la figure suivante présente ces résultats :

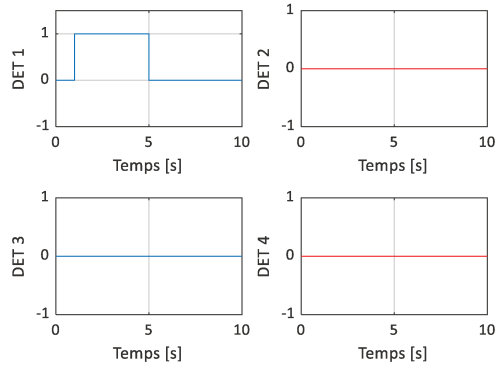


Figure III.30 Les déterminants du test Page Hinkley pour le 1^{er} scénario de défaut

Pour le 2^{ème} scénario de défauts capteurs, les déterminants obtenus dans le cas d'utilisation d'un schéma DOS sont présentés ci-dessous :

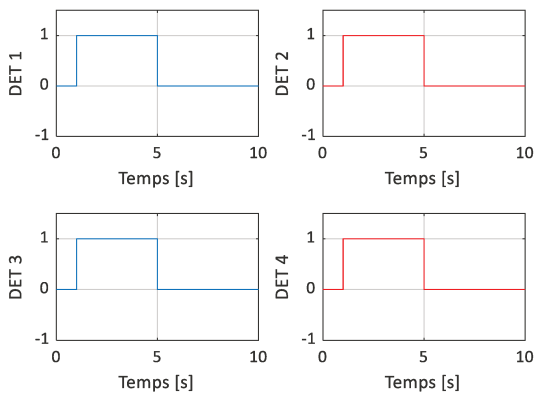


Figure III.31 Les déterminants des résidus de l'observateur 1

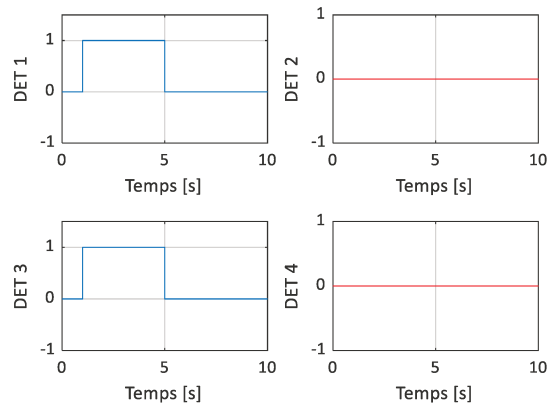


Figure III.32 Les déterminants des résidus de l'observateur 2

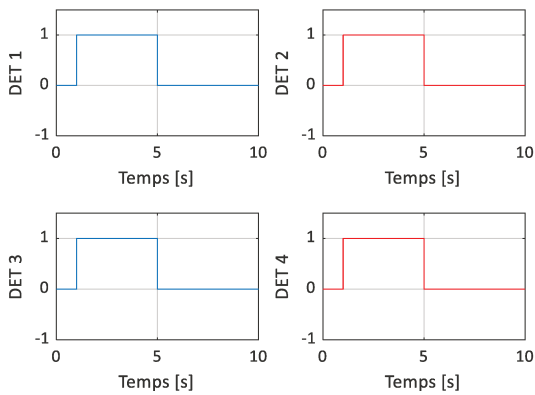


Figure III.33 Les déterminants des résidus de l'observateur 3

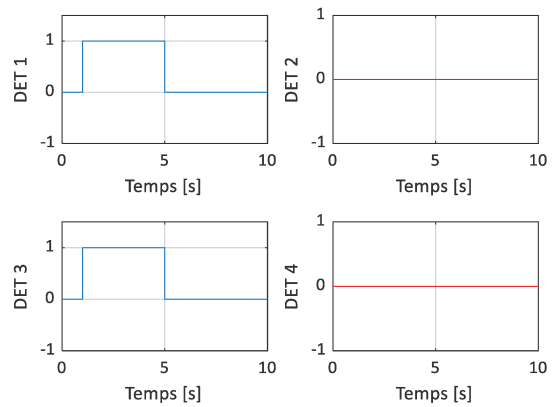


Figure III.34 Les déterminants des résidus de l'observateur 4

Les résultats de ce travail ont été présentés lors d'une Conférence Internationale '2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference' [Idrissi, 2017]

III.4.3 Diagnostic des défauts composants de la MADA

Cette partie est consacrée au traitement du problème de diagnostic des défauts composants de la MADA ou aussi appelés les défauts système. Un défaut composant est un défaut affectant les composants internes d'un système ; il se manifeste généralement par une variation des paramètres de celui-ci et entraîne un fonctionnement dégradé du système ou peut même conduire à l'instabilité de ce dernier. Il est difficile de représenter mathématiquement les défauts composants, c'est pourquoi, ils se traduisent généralement par un changement dans l'équation d'états du système. Ce changement peut être soit paramétrique soit structurel ou fonctionnel.

Parmi les défauts électriques des composants des machines à induction, dont la MADA, nous trouvons : le défaut de court-circuit au niveau du stator ou au niveau du rotor de la machine. Ce type de défaut peut se présenter soit par un court-circuit inter-spores, soit un court-circuit entre phases ou un court-circuit entre phase et le neutre (via la carcasse). Schématiquement, il est représenté par la liaison entre deux points des spires bobinées. Il est généralement causé par la détérioration locale des isolants, entraînée par les facteurs suivants [Aubert, 2014]: l'échauffement excessif des matériaux des isolants suite au défaut du circuit de refroidissement, surcharge, transitoire de démarrage, température ambiante ; le déséquilibre des tensions d'alimentation de la machine, les démarrages fréquents, les efforts électrodynamiques exercés sur les conducteurs de phases, les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques, les conditions environnementales comme l'humidité, les réactions chimiques à base d'oxyde d'azote présent dans l'atmosphère, la corrosion ...etc. Tous ces facteurs conduisent à la destruction des isolants ou à moins à la réduction de leur durée de vie.

Les courts-circuits au niveau du bobinage statorique constituent des défauts électriques les plus répandus dans les machines. Ces défaillances sont causées principalement par une dégradation des matériaux isolants recouvrant les conducteurs. Tous les types de courts-circuits commencent généralement par un court-circuit inter-spores (ou inter-phases) qui apparaît fréquemment au niveau des têtes de bobine, les plus sujettes aux efforts électromagnétiques et aux croisements du bobinage.

Les défauts des enroulements statoriques de la machine, dont les défauts de courts-circuits, sont schématisés comme suit :

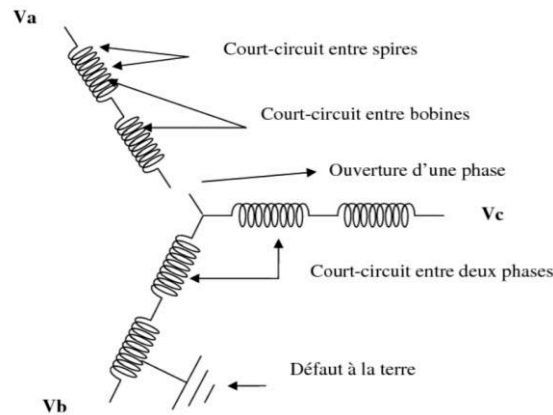


Figure III.35 Défauts statoriques [Harir 2009]

Pour ces raisons, nous avons choisi dans cette partie de développer une méthode à base de modèle pour le diagnostic du défaut de court-circuit inter-spores des enroulements statoriques de la machine asynchrone à double alimentation. L'approche proposée permet de détecter la présence du défaut, de localiser la phase statorique affectée par le défaut et de déterminer l'amplitude du défaut. La détection du défaut est réalisée par l'analyse des signaux des résidus, ces indicateurs de défauts représentent les erreurs d'estimation des courants statoriques de la MADA par le filtre de Kalman linéaire. L'utilisation de ce dernier est expliquée par le fait que le modèle d'état établi de la MADA est un modèle linéaire à paramètre variant (LPV). La phase de localisation est assurée par l'ouverture de la boucle fermée de l'observateur, ensuite l'amplitude du défaut est déterminée.

La première étape est l'écriture du modèle d'état de la MADA dans le repère stationnaire (α , β) lié au champ tournant, en intégrant dans l'équation dynamique du système, le défaut de court-circuit inter-spores des enroulements statoriques de la machine. En utilisant ce modèle, l'approche de diagnostic de ce défaut est ensuite décrite et finalement, les résultats de simulation sont présentés.

III.4.3.1 Diagnostic des défauts de court-circuit inter-spores des enroulements statoriques

- *Modèle d'état de la MADA avec le défaut de court-circuit inter-spores des enroulements statoriques*

La conception des approches de diagnostic basées sur l'observateur nécessite l'écriture de la dynamique du système étudié sous la forme de représentation d'état. Le modèle d'état de la MADA avec la prise en considération du défaut du court-circuit inter-spores des enroulements du stator, est écrit dans le repère stationnaire diphasé d'axes α - β , comme suivant [Q. Lu 2011] :

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + \frac{1}{R_s} \cdot \frac{2 \cdot \mu}{2 \cdot \mu - 3} \cdot A \cdot \begin{bmatrix} f_x \cdot f_x^T \cdot v_{s_ \alpha\beta} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} \\ y = C \cdot x \end{cases} \quad \text{III.80}$$

D'où x est le vecteur des variables d'état du système, composé des courants du stator et du rotor de la MADA, exprimés dans le repère fixe (α, β) ; u est le vecteur des variables d'entrée, formé des tensions du stator et du rotor de la machine dans le même référentiel ; y est le vecteur des sorties, il est constitué des courants statoriques et rotoriques de la MADA, établis dans le repère (α, β) .

Les vecteurs x , u et y sont écrits respectivement comme suivant:

$$x = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad i_{r\alpha} \quad i_{r\beta}]^T \quad \text{III.81}$$

$$u = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta} \quad v_{r\alpha} \quad v_{r\beta}]^T \quad \text{III.82}$$

$$y = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad v_{r\alpha} \quad i_{r\beta}]^T \quad \text{III.83}$$

De plus, μ est le niveau du défaut, il est obtenu en calculant le rapport entre le nombre de spires court-circuitées dans une phase et le nombre total des spires de la même phase. f_x est la position du défaut de court-circuit inter-spires d'un enroulement statorique. Ce paramètre détermine la phase défaillante parmi les enroulements du stator et il est défini dans le repère fixe par :

$$f_a = [1 \quad 0]^T; f_b = \left[-\frac{1}{2} \quad \frac{\sqrt{3}}{2}\right]^T; f_c = \left[-\frac{1}{2} \quad -\frac{\sqrt{3}}{2}\right]^T \quad \text{III.84}$$

Avec : a , b et c désignent les enroulements triphasés du stator de la machine.

Les matrices $A \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$, $B \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ et $C \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ sont respectivement la matrice d'état, la matrice de commande ou d'entrée et la matrice de sortie, définies préalablement dans la section (III.4.1).

Comme pour toutes les approches de diagnostic des défauts basées sur un modèle, notre approche consiste en trois étapes principales, à savoir : l'étape de détection du défaut, l'étape de localisation du défaut et une phase finale d'identification du défaut. Premièrement, la détection vise à déterminer la présence ou l'absence d'une panne dans le système. Deuxièmement, l'isolation des défauts permet de déterminer la position du défaut, son temps d'apparition, le temps de sa disparition et aussi sa durée. Enfin, l'identification de défaut permet la détermination de l'amplitude du défaut, de son type et de sa nature.

La figure suivante récapitule les étapes des méthodes de diagnostic des défauts à base de modèle :

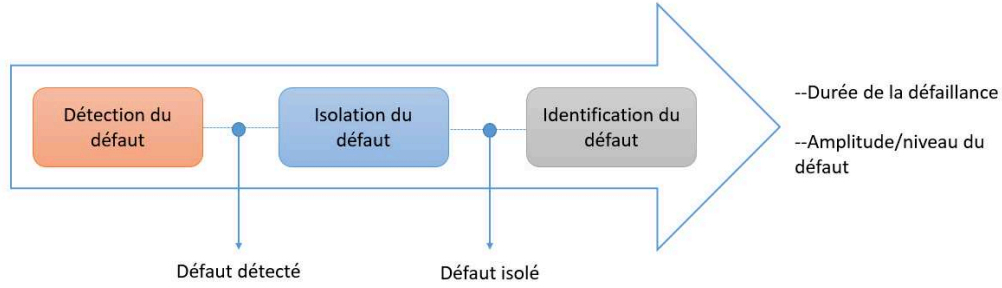


Figure III.36 Schéma d'une approche de diagnostic basée sur un modèle

- *Approche de diagnostic du défaut de court-circuit inter-spires des enroulements statoriques*

1. L'étape de détection du défaut de court-circuit inters-pires d'une phase statorique :

Selon le modèle dynamique, donné dans l'équation (III.80), le défaut de court-circuit inter-spires d'une phase statorique, est considéré comme un défaut d'actionneur. Pour détecter son occurrence, les erreurs d'estimation des courants statoriques et rotoriques, par le filtre de Kalman classique qui tient compte de la variabilité de la matrice d'état A , notés respectivement $e_{i_{s-\alpha\beta}}$ et $e_{i_{r-\alpha\beta}}$ sont utilisées en tant qu'indicateurs de défauts ou résidus.

Ces erreurs d'estimation sont données par :

$$e_{i_{s-\alpha\beta}} = \hat{i}_{s-\alpha\beta} - i_{s-\alpha\beta} \quad \text{III.85}$$

$$e_{i_{r-\alpha\beta}} = \hat{i}_{r-\alpha\beta} - i_{r-\alpha\beta} \quad \text{III.86}$$

D'où $\hat{i}_{s-\alpha\beta}$, $\hat{i}_{r-\alpha\beta}$ sont respectivement les courants statoriques et rotoriques estimés par le filtre de Kalman linéaire, $i_{s-\alpha\beta}$, $i_{r-\alpha\beta}$ sont respectivement les courants du stator et du rotor donnés par le modèle LPV du système MADA.

Les équations du filtre de Kalman décrivant l'évolution dynamique de \hat{x} sont les suivantes:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \hat{x}(t) = \hat{x} = (A_0 + A_1 \cdot \omega) \cdot \hat{x} + B \cdot u - K \cdot (\hat{y} - y) \\ \hat{y} = C \cdot \hat{x} \end{cases} \quad \text{III.87}$$

Avec : \hat{x} est le vecteur des états estimés ; u est le vecteur d'entrée du système et \hat{y} est le vecteur des sorties estimées du système. Les vecteurs d'état et de sortie sont donnés par :

$$\hat{x} = [\hat{i}_{s\alpha} \quad \hat{i}_{s\beta} \quad \hat{i}_{r\alpha} \quad \hat{i}_{r\beta}]^T \quad \text{III.88}$$

$$\hat{y} = [\hat{i}_{s\alpha} \quad \hat{i}_{s\beta} \quad \hat{i}_{r\alpha} \quad \hat{i}_{r\beta}]^T \quad \text{III.89}$$

Les résidus sont ensuite analysés et évalués à l'aide du test de Page-Hinkley dans le but d'éviter les fausses alarmes et différencier le défaut des bruits du système.

2. L'étape d'isolation ou de localisation du défaut de court-circuit inter-spires dans les enroulements statoriques :

Dans cette étape, la phase statorique, affectée par le défaut considéré, parmi les trois enroulements du stator, est déterminée avec précision. Pour se faire, l'équation dynamique des erreurs d'estimation des courants de stator est écrite comme suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_{i_{s,\alpha\beta}} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} = (A - K \cdot C) \cdot \begin{bmatrix} e_{i_{s,\alpha\beta}} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} - \frac{1}{R_s} \cdot \frac{2 \cdot \mu}{2 \cdot \mu - 3} \cdot A \cdot \begin{bmatrix} f_x \cdot f_x^T \cdot v_{s-\alpha\beta} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} \quad \text{III.90}$$

Lorsque la contre-réaction du filtre de Kalman est ouverte, les erreurs d'estimation des courants de stator de DFIG, notées $e_{i_{s-\alpha\beta}}$, peuvent être écrites comme suit:

$$e_{i_{s-\alpha\beta}} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{2 \cdot \mu}{2 \cdot \mu - 3} \cdot f_x \cdot f_x^T \cdot v_{s-\alpha\beta} \quad \text{III.91}$$

D'après cette formule, On peut remarquer que les résidus $e_{i_{s-\alpha\beta}}$ dépendent du paramètre de position du défaut f_x . Par conséquent, la phase statorique défaillante, peut être déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$f_x \cdot f_x^T = R_s \cdot \frac{(2 \cdot \mu - 3)}{2 \cdot \mu} \cdot e_{i_{s-\alpha\beta}} \cdot \left(\frac{1}{v_{s-\alpha\beta}} \right) \quad \text{III.92}$$

Le tableau ci-après montre la phase statorique affectée par le défaut de court-circuit inter-spires :

Tableau III.2 Position du défaut de court-circuit inter-spires d'une phase statorique

• Phase statorique défaillante	• Position du défaut ($f_x \cdot f_x^T$)
• Phase 'a'	• $f_a \cdot f_a^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
• Phase 'b'	• $f_b \cdot f_b^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{4} \\ -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{3}{4} \end{bmatrix}$
• Phase 'c'	• $f_c \cdot f_c^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{3}{4} \end{bmatrix}$

3. L'étape de détermination du niveau du défaut de court-circuit inter-spores :

Après avoir localisé la phase statorique affectée par le défaut étudié, nous allons dans cette étape, déterminer le niveau du défaut ; cela revient à calculer la valeur du paramètre μ . Pour cela, Une simplification est apportée à l'équation (III.90) en remplaçant le terme $((2 \cdot \mu) / (2 \cdot \mu - 3))$ par θ :

$$\theta = \frac{2 \cdot \mu}{2 \cdot \mu - 3} \quad \text{III.93}$$

Ainsi, l'équation (III.90) devient comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_{i_s \alpha\beta} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} = (A - K \cdot C) \cdot \begin{bmatrix} e_{i_s \alpha\beta} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} - \frac{1}{R_s} \cdot \theta \cdot A \cdot \begin{bmatrix} f_x \cdot f_x^T \cdot v_{s-\alpha\beta} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} \quad \text{III.94}$$

Par conséquent, θ peut être calculé ainsi :

$$\theta = (R_s \cdot (A - K \cdot C) \cdot \begin{bmatrix} e_{i_s \alpha\beta} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_{i_s \alpha\beta} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}) / (A \cdot \begin{bmatrix} f_x \cdot f_x^T \cdot v_{s-\alpha\beta} \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}) \quad \text{III.95}$$

Le paramètre μ est alors déterminé, comme le montre la formule suivante:

$$\mu = \frac{3 \cdot \theta}{2 \cdot \theta - 1} \quad \text{III.96}$$

Pour montrer l'efficacité de l'approche proposée dans le diagnostic du défaut de court-circuit inter-spores des enroulements statoriques, dans le cas d'une valeur faible du défaut et dans le cas d'une valeur élevée du défaut, nous avons considéré le scénario de défaut suivant :

Il consiste à injecter un défaut de court-circuit inter-spores de 25% dans la phase statorique 'c', à l'instant $t = 2$ [s]. L'impact de ce défaut sur les courants triphasés du stator et du rotor de la MADA est illustré dans les figures suivantes :

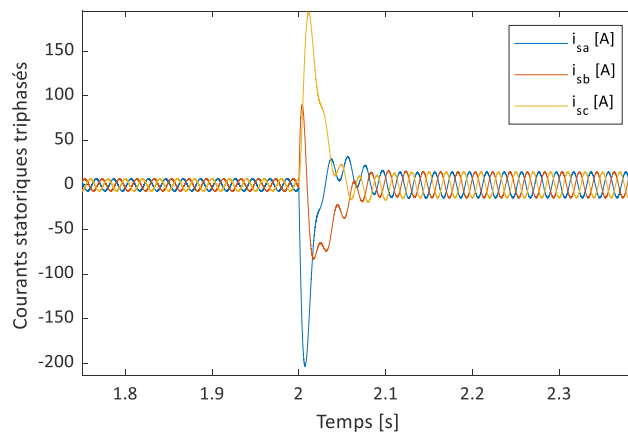


Figure III.37 Courants statoriques triphasés_scénario du défaut 1

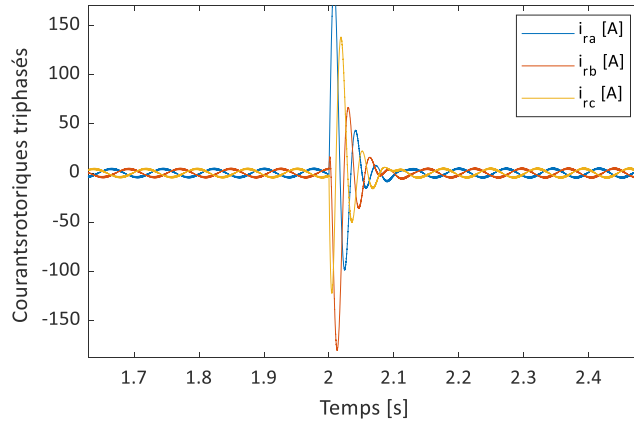


Figure III.38 Courants rotoriques triphasés_scénario du défaut 1

Sur la figure III.37, nous remarquons qu’une fluctuation apparaît au niveau des courants triphasés du stator au moment d’occurrence du défaut de court-circuit inter-spores. L’amplitude des courants statoriques au a augmenté suite à la présence du défaut. La figure III.38 montre que les courants triphasés du rotor fluctuent au moment de présence du défaut, mais leurs amplitudes sont maintenues inchangées et égales aux valeurs nominales. Par conséquent, nous pouvons conclure que les courants statoriques triphasés sont plus affectés par le défaut étudié, ce qui paraît évident puisque le défaut est injecté dans la phase statorique ‘c’.

La détection du défaut est effectuée en observant et en analysant les résidus du stator et du rotor. Ces résidus sont les erreurs d’estimation des courants de la MADA, obtenus par la comparaison entre les courants donnés en sortie du modèle LPV de la MADA, auxquelles nous avons ajouté une valeur réduite du bruit blanc gaussien afin de simuler le fonctionnement réel de la machine, et les courants estimés par le filtre de Kalman du type LPV.

Les signatures résiduelles des courants du stator dans le repère stationnaire à deux axes (α, β) sont respectivement données dans les figures suivantes :

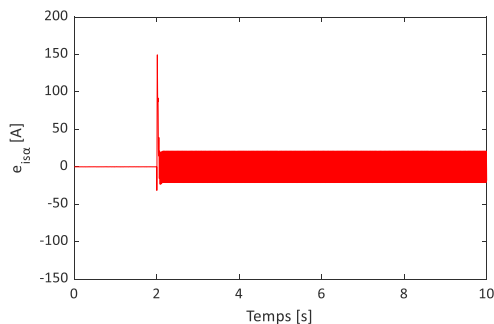


Figure III.39 Signature résiduelle du courant de stator e_{isa}

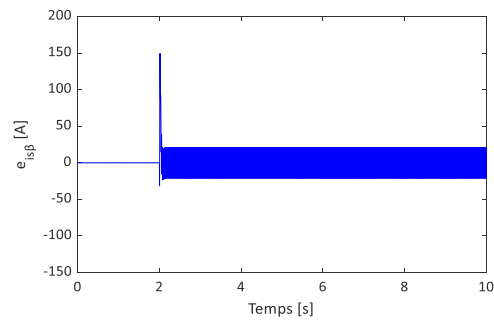


Figure III.40 Signature résiduelle du courant de stator e_{isb}

De plus, les signatures résiduelles des courant rotoriques dans le repère fixe (α, β), sont respectivement données aux figures ci-dessous :

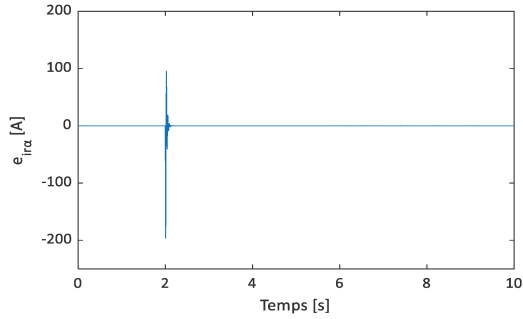


Figure III.41 Signature résiduelle du courant de stator e_{ira}

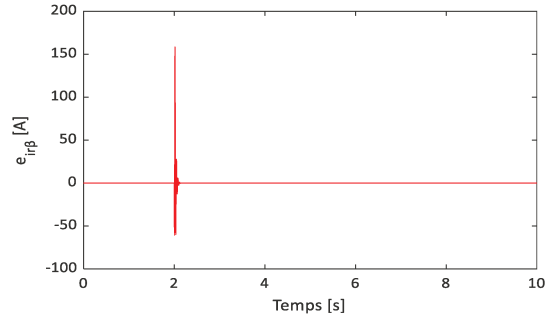


Figure III.42 Signature résiduelle du courant de stator e_{isb}

Il paraît d'après ces figures que les signaux des résidus des courants statoriques sont les plus affectés par le défaut étudié. Tandis que les signaux de résidus des courants rotoriques présentent une fluctuation à l'instant $t = 2$ [s] mais après cet instant la valeur des résidus est maintenue égale de zéro.

L'analyse des résidus par le test Page-Hinkley, aboutit aux résultats suivants :

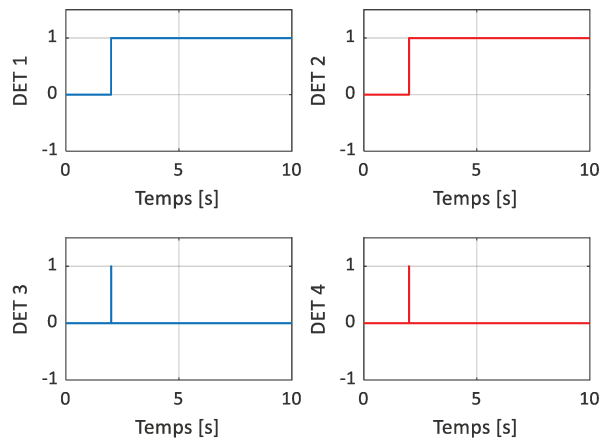


Figure III.43 Les déterminants obtenus par le test de Page-Hinkley

Après avoir détecté la présence du défaut à l'instant $t = 2$ [s] au niveau des enroulements statoriques, la phase statorique affectée est déterminée en se référant à l'équation (III.92) alors, le résultat obtenu est donné par :

$$f_x \cdot f_x^T = \begin{bmatrix} 0,2483 & 0,4358 \\ 0,4358 & 0,24830 \end{bmatrix}$$

En comparant ce résultat avec les données du tableau (III.2), nous avons ce qui suit :

$$f_x \cdot f_x^T = \begin{bmatrix} 0,2483 & 0,4358 \\ 0,4358 & 0,24830 \end{bmatrix} \sim f_c \cdot f_c^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{1}{4} \end{bmatrix}$$

En conclusion, le défaut de court-circuit inter-spores, est produit dans la phase statorique 'c'.

Une détermination précise de la valeur du défaut de court-circuit inter-spires, est réalisée à l'aide de la troisième étape de la procédure de diagnostic des défauts basée sur un modèle. Par conséquent, la valeur du défaut μ au moment de présence du défaut, est calculée :

$$\mu = [0.2499 \quad 0.2498 \quad 0.2495 \quad 0.2505]^T$$

L'évolution en fonction du temps, du paramètre μ est donnée sur la figure suivante :

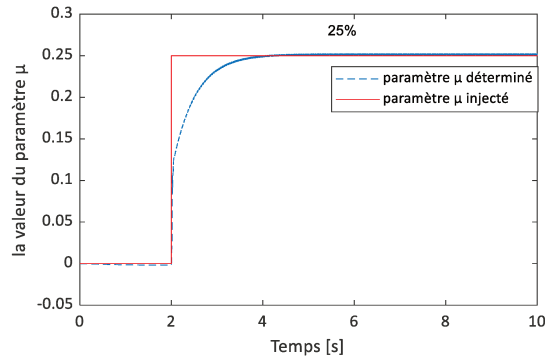


Figure III.44 Valeur déterminée du paramètre μ

Un autre scénario du défaut est considéré, afin de prouver l'efficacité de l'approche proposée pour diagnostiquer une faible valeur du défaut de court-circuit inter-spires des enroulements statoriques. Ce scénario consiste à injecter un défaut de court-circuit inter-spires de 1% à l'instant $t = 2$ [s] dans la phase statorique 'b'.

L'effet du défaut de court-circuit inter-spires de 1% injecté dans la phase statorique 'b' dans les enroulements statoriques, sur les courants statoriques et rotoriques de la MADA, est présenté dans :

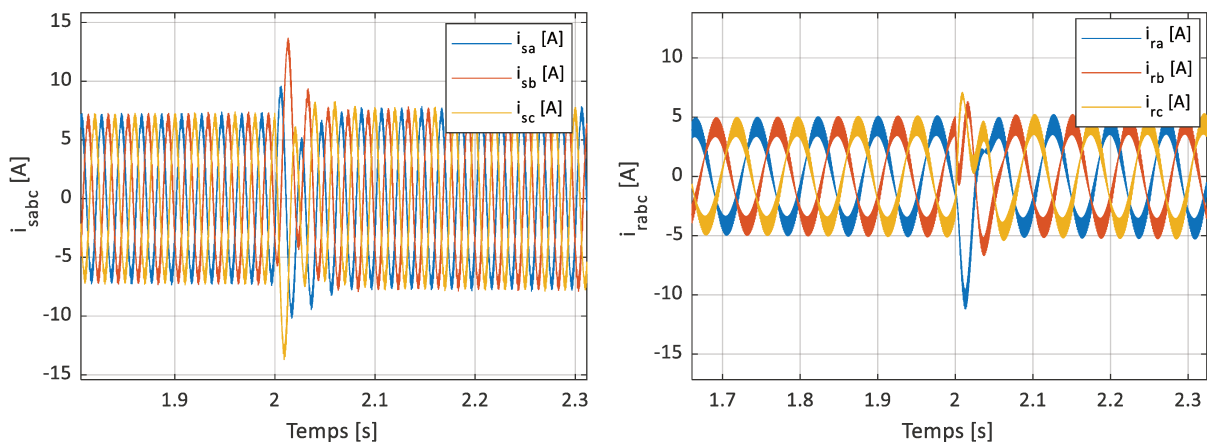


Figure III.45 L'impact du défaut de court-circuit inter-spires de 1% sur les courants de la MADA

Pour l'étape de détection, les résidus obtenus sont illustrés dans les figures ci-dessous :

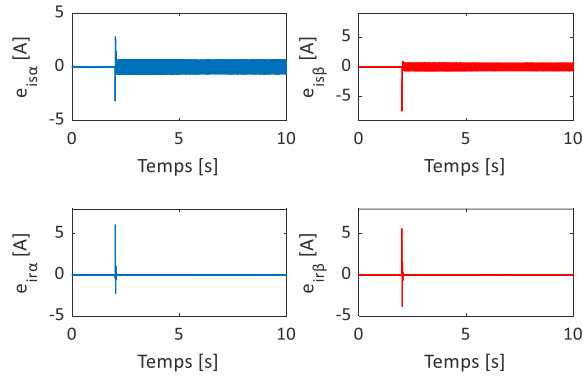


Figure III.46 Les signatures résiduelles pour le 2^{ème} scénario de défaut

Comme pour le premier scénario de défaut, les signatures résiduelles des courants du stator $e_{is\alpha}$, $e_{is\beta}$ sont plus affectées que celles des courants du rotor notés $e_{ir\alpha}$ et $e_{ir\beta}$.

Dans l'étape de localisation de la phase statorique en défaut, nous avons :

$$f_x \cdot f_x^T = \begin{bmatrix} 0,2322 & -0,4031 \\ -0,4031 & 0,2322 \end{bmatrix} \sim f_b \cdot f_b^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{4} \\ -\frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{1}{4} \end{bmatrix}$$

En conséquence, le défaut de court-circuit inter-spices s'est produit dans la phase 'b' des enroulements du stator.

De plus, la valeur du défaut dans ce cas est donnée par :

$$\mu = [0.009284 \quad 0.009282 \quad 0.009293 \quad 0.009313]^T$$

Le graphe suivant présente la valeur du paramètre μ déterminée :

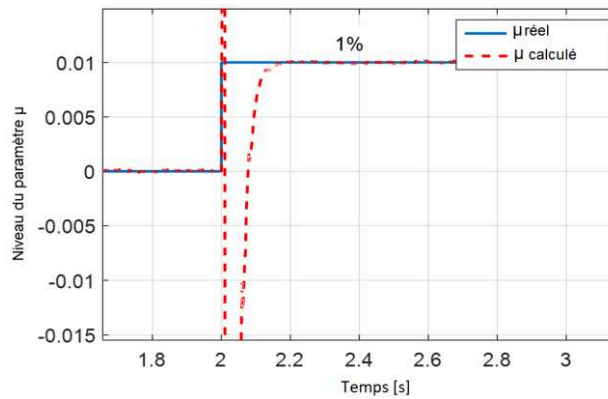


Figure III.47 Niveau déterminé du paramètre μ (Scénario du défaut 2)

Nous remarquons sur la figure, que le niveau de défaut de court-circuit inter-spores, désigné par le paramètre μ , est déterminé. Il est égal à 1 % suite à la présence du défaut à l'instant $t = 2$ [s] selon le 2^{ème} scénario du défaut.

En conclusion, l'approche proposée de diagnostic du défaut de court-circuit inter spires des enroulements statoriques, permet de détecter le défaut, de localiser la phase statorique défailante et de déterminer le niveau du défaut qu'il soit faible ou élevé.

Les résultats présentés dans cette partie ont été présenté lors de la Conférence Internationale '2019-6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies CoDiT'2019'.

III.4.3.2 Diagnostic des défauts de variation des valeurs de résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA

Les valeurs nominales des résistances statorique R_s et rotorique R_r de la MADA, sont augmentées suite à l'augmentation de la température des enroulements. Cette variation des valeurs de référence des résistances de la MADA est définie comme étant un défaut système.

La relation entre l'augmentation de la valeur de la résistance d'une phase statorique ou rotorique de la machine et l'augmentation de la température, est donnée par l'expression suivante :

$$\begin{cases} R_s = R_{s_ref} \cdot (1 + \alpha_s \cdot (T_s - T_{ref})) \\ R_r = R_{r_ref} \cdot (1 + \alpha_r \cdot (T_r - T_{ref})) \end{cases} \quad \text{III.97}$$

D'où : T_{ref} est la température de référence qui correspond à la température ambiante $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$., α_s est le coefficient de température du bobinage du stator (cuivre) : $\alpha_s = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ et α_r est le coefficient de température du bobinage du rotor (cuivre/aluminium) : $\alpha_r = 4,03 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

R_{s_ref} et R_{r_ref} désignent les valeurs de résistances stator et rotor à la température T_{ref} , R_{s_ref} est déterminée lors de la magnétisation de la machine et R_{r_ref} est déterminée une fois que le couple est produit. À cet instant, les températures de stator et du rotor sont supposées égales à la température ambiante facilement mesurable.

Les températures T_s et T_r peuvent être mesurées en plaçant des thermocouples dans les têtes des enroulements du stator et du rotor.

Dans cette section, nous allons traiter le problème de diagnostic du défaut d'augmentation des valeurs des résistances du stator et du rotor de la MADA suite à l'augmentation de la température. Plusieurs méthodes basées sur les techniques d'estimation ou de filtrage, pour la détection et l'isolation des défauts de paramètres dans des machines à induction, ont été proposées. L'estimation

des paramètres d'un système à l'aide d'observateurs ou d'approches de filtrage est une procédure indirecte consistant à augmenter le vecteur d'état en définissant les paramètres à surveiller en tant que variables d'état supplémentaires. La détection des défauts des paramètres est obtenue en évaluant l'écart entre les valeurs mesurées et leurs valeurs nominales prédéfinies. Citons à titre d'exemple, l'observateur à entrées inconnues proposé dans [M Abdelrahem 2015], pour estimer à la fois l'état et les entrées inconnues de la MADA. De plus, un Filtre de Kalman Étendu (FKE) est utilisé pour l'estimation des paramètres électriques de la machine asynchrone doublement alimentée, employée dans des systèmes éoliens à vitesse variable dans [J Talla 2015]. Un FKE augmentée est utilisé pour estimer la résistance du rotor et du stator du moteur à induction (IM) dans [Azad 2011]. Le filtre de Kalman étendu (FKE) et le Filtre de Kalman non parfumé (UKF) sont utilisés pour l'estimation des paramètres de la MADA entraînée par une éolienne dans [Chahmi, A. 2017]. Dans [L Li, 2016], deux filtres de Kalman étendu (FKE) sont utilisés pour l'estimation à la fois de l'état et des paramètres du véhicule.

Pour suivre les changements des valeurs des résistances statorique et rotorique de la MADA d'une éolienne, l'estimation d'état et des paramètres à surveiller est basée sur le filtre de Kalman étendu (FKE). L'estimation de l'état et des résistances nécessite donc la considération des paramètres surveillés comme des états supplémentaires et ainsi un vecteur d'état augmenté est construit.

Alors, le vecteur d'état augmenté de la MADA, donné par l'équation (III.81), devient alors comme suit :

$$\begin{aligned} x(k) &= [i_{s\alpha}(k) \quad i_{s\beta}(k) \quad i_{r\alpha}(k) \quad i_{r\beta}(k) \quad R_s(k) \quad R_r(k)]^T \\ x(k) &= [x_1(k) \quad x_2(k) \quad x_3(k) \quad x_4(k) \quad x_5(k) \quad x_6(k)]^T \end{aligned} \quad \text{III.98}$$

Avec :

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ sont les courants statoriques et rotoriques de la MADA dans le repère stationnaire (α, β) lié au champ tournant,

R_s, R_r sont respectivement la résistance d'une phase statorique et la résistance d'une phase rotorique.

Dans ce cas, le modèle d'état de la MADA en temps discret, est écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} x(k+1) = f(x(k), u(k)) + w(k) \\ y(k) = h(x(k), u(k)) + v(k) \end{cases} \quad \text{III.99}$$

Les équations dynamiques, modélisant de façon détaillée le système étudié, sont établies ci-après :

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= -\frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot x_5(k) \cdot x_1(k) + \left(\frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \omega + \omega_s \right) \cdot x_2(k) + \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot x_6(k) \cdot x_3(k) + \frac{M}{\sigma \cdot L_s} \cdot \omega \cdot x_4(k) \\ &+ \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot u_1(k) - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot u_3(k) + w_1(k) \end{aligned} \quad \text{III.100}$$

$$x_2(k+1) = -\left(\frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \omega + \omega_s\right) \cdot x_1(k) - \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot x_5(k) \cdot x_2(k) + \frac{M}{\sigma \cdot L_s} \cdot \omega \cdot x_3(k) + \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot x_6(k) \cdot x_4(k) \quad \text{III.101}$$

$$+ \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot u_1(k) - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot u_3(k) + w_2(k)$$

$$x_3(k+1) = \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot x_5(k) \cdot x_1(k) - \frac{M}{\sigma \cdot L_r} \cdot \omega \cdot x_2(k) - \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot x_6(k) \cdot x_3(k) + \left(\omega_s - \frac{\omega}{\sigma}\right) \cdot x_4(k) \quad \text{III.102}$$

$$- \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot u_1(k) + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot u_3(k) + w_3(k)$$

$$x_4(k+1) = \frac{M}{\sigma \cdot L_r} \cdot \omega \cdot x_1(k) + \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot x_5(k) \cdot x_2(k) - \left(\omega_s - \frac{\omega}{\sigma}\right) \cdot x_3(k) - \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot x_6(k) \cdot x_4(k) \quad \text{III.103}$$

$$- \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot u_2(k) + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot u_4(k) + w_4(k)$$

$$x_5(k+1) = x_5(k) \cdot (1 + \alpha_s \cdot \Delta T) + w_5(k) = a_7 \cdot x_5(k) + w_5(k) \quad \text{III.104}$$

$$x_6(k+1) = x_6(k) \cdot (1 + \alpha_r \cdot \Delta T) + w_6(k) = a_8 \cdot x_6(k) + w_6(k) \quad \text{III.105}$$

Par conséquent, un Filtre de Kalman Étendu (FKE) est utilisé pour estimer les états du système puisque en analysant le modèle d'état augmenté décrit ci-dessus, nous constatons qu'il s'agit d'un modèle d'état non linéaire du fait de la multiplication entre les différents états dans les équations dynamiques.

- Application de l'FKE pour l'estimation des courants et des résistances de la MADA :

L'application de l'algorithme de l'observateur de Kalman étendu, décrit dans la section (III.3.3.2-A), pour l'estimation des courants et des résistances du générateur MADA nécessite tout d'abord la vérification de l'observabilité du système. Etant donné qu'il s'agit d'un modèle non linéaire, l'observabilité doit être vérifiée localement autour de chaque point de fonctionnement [Trigeassou, 2013]. L'observabilité peut être vérifiée en calculant la matrice d'observabilité et son rang ; la matrice d'observabilité est donnée par :

$$O_{bsv}[K] = [H_k \quad H_k \cdot F_k \quad H_k \cdot F_k^2 \quad H_k \cdot F_k^3 \quad H_k \cdot F_k^4 \quad H_k \cdot F_k^5]^T \quad \text{III.106}$$

Le système étudié est observable si et seulement si la matrice d'observabilité $O_{bsv}[k]$ a un rang plein, c'est-à-dire que dans cette étude, $\text{rang}(O_{bsv}[K]) = 6$, avec le nombre 6 représente le nombre des états du modèle de la MADA.

Les matrices F_k , H_k et $O_{bsv}[K]$ sont calculés pour chaque instant d'échantillonnage ($k \geq 0$).

Les matrices Jacobiennes de l'état du système F_k et d'observation H_k et la matrice d'entrée B_k sont exprimées dans l'ordre indiqué comme suit:

$$F_k = \begin{bmatrix} -a_1 & a \cdot \omega + \omega_s & a_3 & a_5 \cdot \omega & 0 & 0 \\ -(a \cdot \omega + \omega_s) & -a_1 & -a_5 & a_3 & 0 & 0 \\ a_4 & -a_6 \cdot \omega & -a_2 & \left(\omega_s - \frac{\omega}{\sigma}\right) & 0 & 0 \\ a_6 \cdot \omega & a_4 & -\left(\omega_s - \frac{\omega}{\sigma}\right) & -a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_8 \end{bmatrix} \quad \text{III.107}$$

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{III.108}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & -b_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & -b_3 & 0 & 0 \\ -b_3 & 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b_3 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{III.109}$$

Les constantes a , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 , b_1 , b_2 , b_3 sont définies dans la section (III.4.1), aussi les coefficients a_7 , a_8 sont déterminés précédemment.

Pour le choix des matrices de covariance FKE, P_0 , Q et R sont des matrices diagonales en raison du manque d'informations statistiques permettant d'évaluer leurs termes hors diagonales.

En utilisant un seul FKE, les courants et les résistances de la MADA sont estimées. La condition d'observabilité est vérifiée et les erreurs d'estimation des états du système sont indiquées ci-dessous :

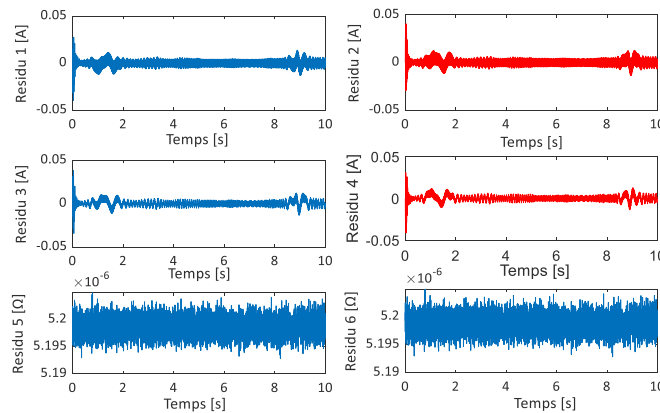


Figure III.48 Les erreurs d'estimation des sorties du système MADA par le FKE

Les erreurs d'estimation montrées sur la figure (III.48) sont obtenues en comparant les sorties du système fournies par le modèle non linéaire de la MADA et leurs estimations données par le seul FKE utilisé. Les signaux des résidus (1), (2), (3), (4), (5) et (6) sont respectivement les erreurs d'estimation des courants $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ et des résistances par phase statorique R_s et par phase rotorique R_r . Ces erreurs d'estimation sont égales à des valeurs réduites proches de zéro, ce qui prouve que le FKE est un estimateur performant.

- L'impact du défaut d'augmentation des valeurs des résistances R_s et R_r sur les variables d'état du système étudié :

Dans un premier temps, nous considérons le scénario de défaut suivant : une augmentation de 10%, 20%, 30% et 40% par rapport à la valeur nominale de la résistance statorique a été appliquée successivement et a été injectée à l'instant $t = 0$ [s]. Les figures ci-dessous indiquent l'évolution temporelle de la vitesse mécanique du générateur, du courant statorique suivant l'axe 'α' et du courant rotorique suivant l'axe 'β' dans des conditions de fonctionnement normal et défaillant.

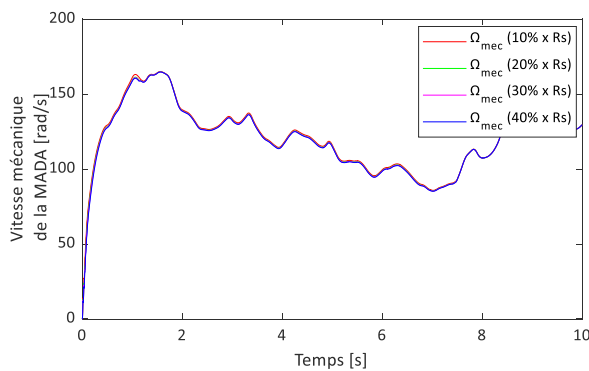


Figure III.49 Vitesse mécanique de la MADA (Scénario du défaut 1)

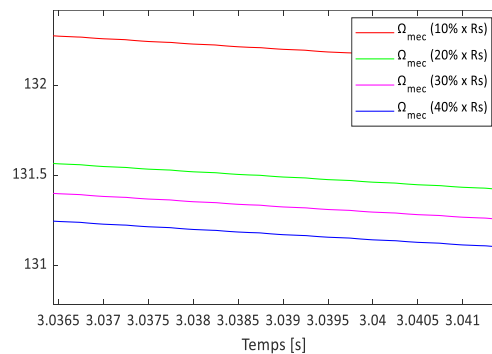


Figure III.50 Zoom sur la vitesse mécanique de la MADA (Scénario du défaut 1)

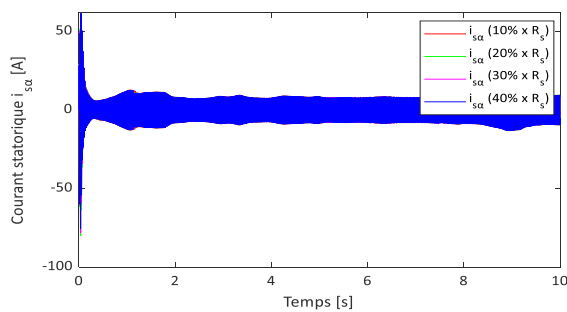


Figure III.51 Courant statorique $i_{s\alpha}$ (Scénario du défaut 1)

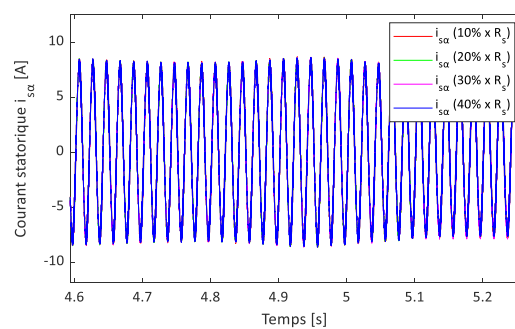


Figure III.52 Zoom sur le courant statorique $i_{s\alpha}$ (Scénario du défaut 1)

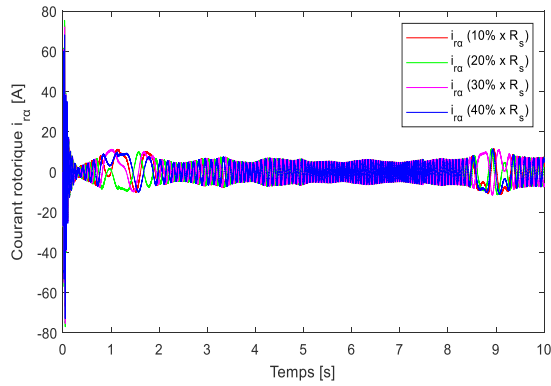


Figure III.53 Courant statorique $i_{r\alpha}$ (Scénario du défaut 1)

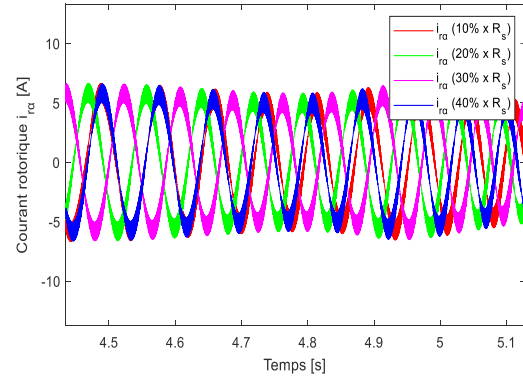


Figure III.54 Zoom sur le courant statorique $i_{r\alpha}$ (Scénario du défaut 1)

Les figures (III.49) et (III.50) indiquent que la vitesse mécanique de la MADA est sensible à ce type de défaut, puisque l'amplitude de cette vitesse est diminuée avec l'augmentation de la valeur de la résistance du stator. Le courant statorique est inchangé en présence du défaut, montré sur les figures (III.51) et (III.52), alors que le courant rotorique est déséquilibré suite à l'occurrence du défaut car il existe une légère différence de phase entre le fonctionnement normal et le fonctionnement défaillant.

Nous avons ensuite considéré un deuxième scénario de défaut qui consiste cette fois-ci en une augmentation successive de 10%, 20%, 60% par rapport à la valeur nominale de la résistance rotorique. ce défaut est injecté au démarrage de la machine ($t = 0$ [s]). Aussi, l'effet de ce type de défaut sur les courants statorique et rotorique et sur la vitesse angulaire du rotor de la génératrice, est montré dans les figures suivantes :

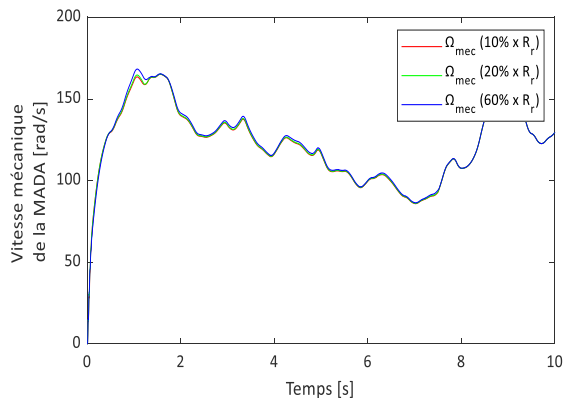


Figure III.55 Vitesse mécanique de la MADA (Scénario du défaut 2)

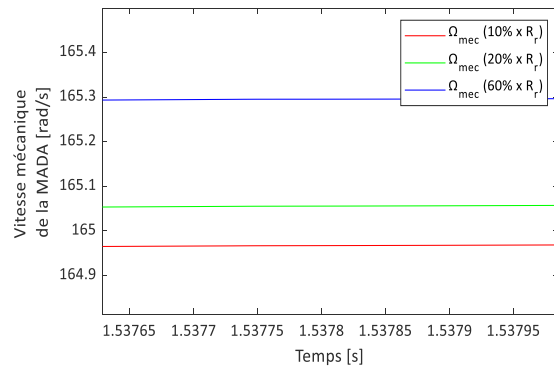


Figure III.56 Zoom sur la vitesse mécanique de la MADA (Scénario du défaut 2)

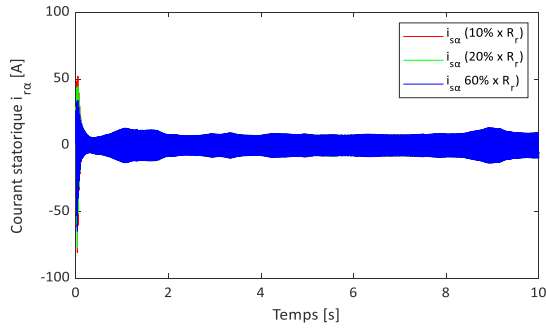


Figure III.57 Courant statorique $i_{s\alpha}$ - Scénario du défaut 2

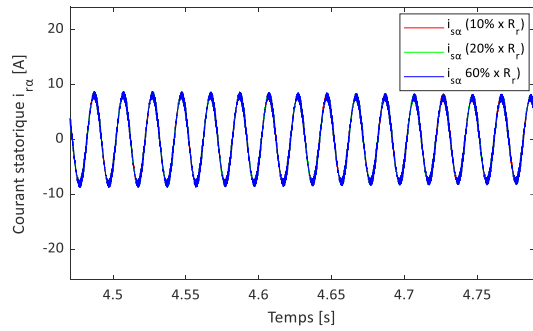


Figure III.58 Zoom sur le courant statorique $i_{s\alpha}$ - Scénario du défaut 2

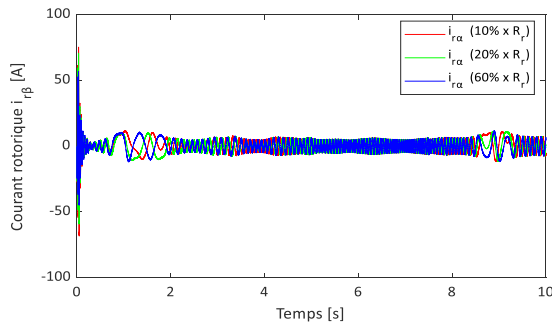


Figure III.59 Courant rotorique $i_{r\alpha}$ - Scénario du défaut 2

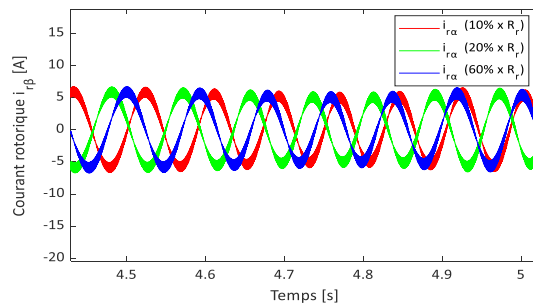


Figure III.60 Zoom sur le courant rotorique $i_{r\alpha}$ - Scénario du défaut 2

D'après les figures présentées ci-dessus, nous avons constaté que ce type de défaut influence la vitesse mécanique. La figure (III.56) montre une variation de l'amplitude de la vitesse mécanique pour les trois cas de défaillance. La vitesse angulaire augmente avec l'augmentation de la valeur de la résistance rotorique. La même remarque que précédemment peut être faite pour les courants du stator, qui restent inchangés lorsque le défaut est apparu, cependant, les courants du rotor sont devenus déséquilibrés.

Nous pouvons donc conclure selon les deux scénarios de défaut d'augmentation de la valeur nominale de la résistance statorique R_s et rotorique R_r , que le courant rotorique et la vitesse mécanique de la MADA sont des variables qui fournissent davantage des informations sur la présence de ce type de défaut dans les enroulements statoriques de la MADA.

Dans ce qui suit, nous avons généré les résidus responsables de la détection et l'isolation du défaut étudié. Pour se faire, un premier scénario de défaut est considéré : il consiste à injecter une augmentation successive de la valeur de la résistance statorique selon le tableau (III.3) et d'appliquer une augmentation au niveau de la résistance rotorique suivant les données du tableau (III.4).

Tableau III.3 Scénario de défaut de la résistance R_s

Tableau III.4 Scénario de défaut de la résistance R_r

Période	ΔR_s
2 [s]—3 [s]	10% x R_s
3 [s]—4 [s]	20% x R_s
4 [s]—5 [s]	30% x R_s
7 [s]—10 [s]	40% x R_s

Période	ΔR_r
1 [s]—4 [s]	10% x R_r
4 [s]—7 [s]	40% x R_r
7 [s]—10 [s]	60% x R_r

L'estimation des résistances statorique et rotorique des enroulements de la MADA, par le biais du Filtre de Kalman étendu, est montrée sur les figures suivantes :

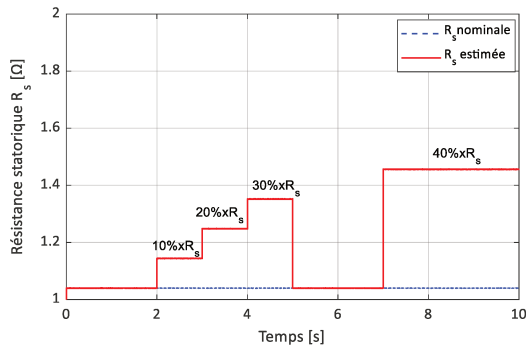


Figure III.61 Valeur estimée de la résistance statorique R_s (Scénario 1)

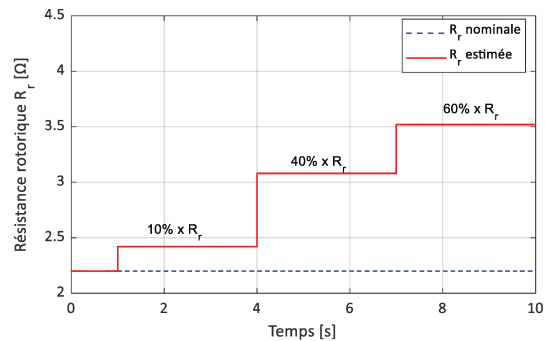


Figure III.62 Valeur estimée de la résistance statorique R_r (Scénario 1)

Les signaux de résidus générés par l'utilisation d'un seul filtre de Kalman Étendu, sont montrés sur la figure suivante :

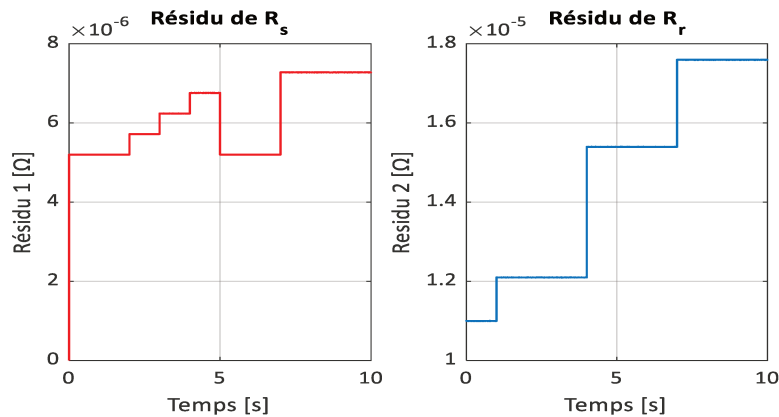


Figure III.63 Résidus des résistances R_s et R_r générés par le FKE

Nous remarquons selon la figure, que les résidus obtenus suite à l'estimation des résistances par le moyen du filtre de Kalman étendu, détectent et isolent les défauts injectés en se référant au premier scénario du défaut.

Le deuxième scénario consiste à introduire un défaut additif dans le premier capteur de courant qui mesure le courant $i_{s\alpha}$ en plus du défaut d'augmentation des valeurs nominales de résistance

selon le précédent scénario. Ce défaut de capteur a été injecté à l'instant $t = 5$ [s] et a disparu à l'instant $t = 7$ [s]. Il s'agit d'ajouter à l'amplitude nominale du courant statorique, une valeur constante égale à 6 [A]. Les signaux résiduels obtenus, générés par le bloc FKE unique, sont donnés à sur la figure suivante :

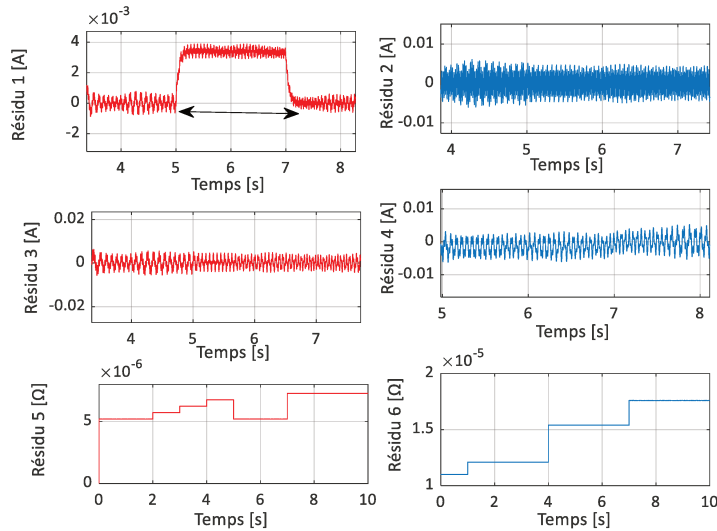


Figure III.64 Signaux des résidus du deuxième scénario de défauts

- Évaluation des résidus :

Une décision est prise sur la base des résultats de l'évaluation des résidus générés. Donc, pour pouvoir évaluer correctement les résidus, la méthode suivante est appliquée :

Un seuil τ est déterminé pour chaque résidu en vue de définir son intervalle d'évolution en cas d'absence du défaut. La valeur du seuil est fixée en fonction des caractéristiques statistiques de chaque résidu en cas de fonctionnement normal. Ensuite, une signature binaire est associée à chaque résidu : '0' en absence du défaut et '1' dans le cas de présence du défaut. De manière simplifiée, la détection de défauts au niveau d'un résidu est effectuée par application du test logique suivant :

Si $|Résidu_i| \leq \tau$ alors aucun défaut n'est détecté sur le résidu, $i = \{1,2,3,4\}$

Si $|Résidu_i| > \tau$ alors un défaut est détecté sur le résidu, $i = \{1,2,3,4\}$

À l'issue du test sur chacun des résidus du 2^{ème} scénario de défauts, nous avons obtenu les signatures binaires présentées sur la figure suivante :

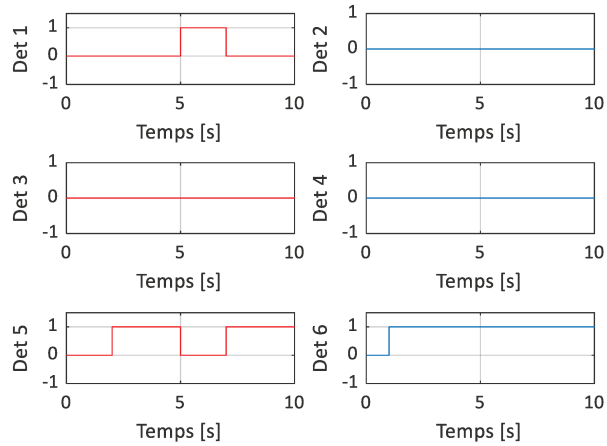


Figure III.65 Signatures binaires du 2^{ème} scénario de défauts

De cette manière, nous avons pu détecter et localiser le défaut additif sur le premier capteur de courant et aussi le défaut d’augmentation des valeurs des résistances du stator et du rotor.

Un troisième scénario de défauts est considéré, il vise à montrer la capacité de l’approche de diagnostic basée sur l’observateur de Kalman étendu, de détecter et de localiser à la fois les défauts multiples et simultanés des capteurs de courant et les défauts d’augmentation de la valeur des résistances statoriques et rotoriques de la MADA. Ce scénario consiste à reprendre les mêmes conditions du 2^{ème} scénario de défauts avec la seule différence d’injection d’un défaut additif d’amplitude 6 [A] à l’instant $t = 5$ [s] et disparaît à l’instant $t = 7$ [s], sur le troisième capteur mesurant le courant $i_{r\alpha}$.

Les résidus obtenus par le moyen de l’utilisation d’un seul FKE sont illustrés sur la figure ci-après :

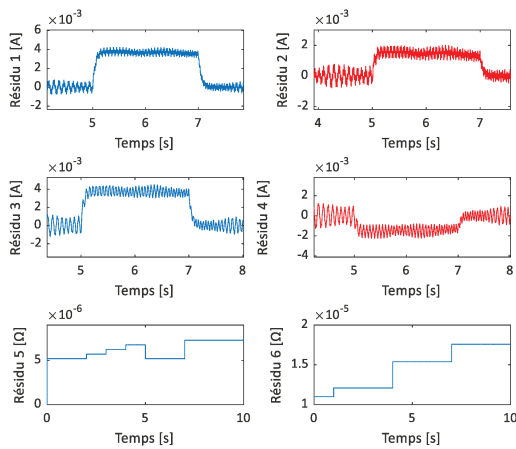


Figure III.66 Signaux des résidus du 3^{ème} scénario de défauts

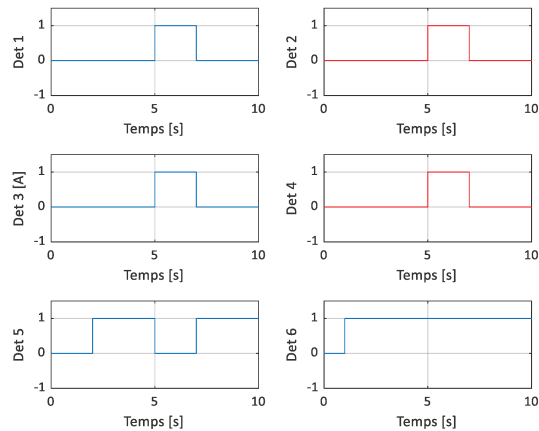


Figure III.67 Déterminants des résidus du 3^{ème} scénario de défauts

En utilisant un seul FKE, il s'avère qu'il est difficile de localiser les capteurs défectueux suite à l'interaction qui existe entre les courants de la MADA alors que les défauts des résistances sont détectés et localisés. Par conséquent, l'observateur unique (simplifié) est incapable de détecter et de localiser des défauts multiples et simultanés des capteurs de courant. Pour résoudre le problème d'interaction des sorties, un banc d'observateurs FKE avec une structure (DOS) ou un schéma (GOS) peuvent être utilisés pour détecter et localiser les capteurs en défaut.

III.4.4 Diagnostic des défauts actionneurs de la MADA

Après avoir effectué le diagnostic des défauts capteurs et défauts composants de la MADA d'une éolienne, nous allons traiter dans cette section le diagnostic du troisième type de défaut. Il s'agit des défauts actionneurs.

Un défaut actionneur affecte un élément de la partie opérative et détruit totalement ou partiellement le signal d'entrée du système. Et c'est ainsi, que l'entrée de commande des actionneurs et la réponse obtenue en sortie, deviennent incohérentes. De manière générale, ces défauts sont considérés comme des défauts additifs. Tandis que, d'autres défauts actionneurs tels que : le blocage et la perte de puissance, sont traités comme des défauts multiplicatifs. Les défauts actionneurs peuvent entraîner une consommation élevée de l'énergie ou une perte totale de contrôle. De ce fait, il est important de mettre en place une approche de détection et d'isolation des défauts d'actionneur dans un système, en vue de maintenir sa disponibilité, sa stabilité et sa fiabilité et d'assurer les fonctions requises.

Dans ce qui suit nous allons étudier le diagnostic de défauts d'actionneur de la MADA.

Écrivons tout d'abord, le modèle d'état augmenté du système dans le repère stationnaire (α, β) , lié au champ tournant, en temps continu comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = g(x(t), t) + B(u(t), t) + w(t) \\ y(t) = h(x(t), t) + v(t) \end{cases} \quad \text{III.110}$$

Le vecteur d'entrée u , les vecteurs augmentés d'état x et de sortie y sont exprimés ainsi :

$$x = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad i_{r\alpha} \quad i_{r\beta} \quad \omega]^T \quad \text{III.111}$$

$$u = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta} \quad v_{r\alpha} \quad v_{r\beta}]^T \quad \text{III.112}$$

$$y = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad i_{r\alpha} \quad i_{r\beta} \quad \omega]^T \quad \text{III.113}$$

Ce nouveau modèle d'état augmenté est obtenu, en intégrant l'équation dynamique de la vitesse de l'arbre du générateur dans l'ancien modèle d'état de la MADA, établi dans la section (III.4.1). Ainsi, la fonction dynamique du système $g(x(t), t)$ peut-être écrite sous cette forme:

$$\begin{aligned}
& g(x(t), u(t), t) \\
& = \begin{cases} -a_1 \cdot i_{s\alpha}(t) + (a \cdot \omega(t) + \omega_s) \cdot i_{s\beta}(t) + a_3 \cdot i_{r\alpha}(t) + a_5 \cdot \omega(t) \cdot i_{r\beta}(t) + b_1 \cdot v_{s\alpha}(t) - b_2 \cdot v_{r\alpha}(t) \\ -(a \cdot \omega(t) + \omega_s) \cdot i_{s\alpha}(t) - a_1 \cdot i_{s\beta}(t) - a_5 \cdot \omega(t) \cdot i_{r\alpha}(t) + a_3 \cdot i_{r\beta}(t) + b_1 \cdot v_{s\beta}(t) - b_2 \cdot v_{r\beta}(t) \\ a_4 \cdot i_{s\alpha}(t) - a_6 \cdot \omega(t) \cdot i_{s\beta}(t) - a_2 \cdot i_{r\alpha}(t) + \left(\omega_s - \frac{\omega(t)}{\sigma} \right) \cdot i_{r\beta}(t) - b_2 \cdot v_{s\alpha}(t) + b_3 \cdot v_{r\alpha}(t) \\ a_6 \cdot \omega(t) \cdot i_{s\alpha}(t) + a_4 \cdot i_{s\beta}(t) - \left(\omega_s - \frac{\omega(t)}{\sigma} \right) \cdot i_{r\alpha}(t) - a_2 \cdot i_{r\beta}(t) - b_2 \cdot v_{s\beta}(t) + b_3 \cdot v_{r\beta}(t) \\ m_1 \cdot M \cdot (i_{s\beta}(t) \cdot i_{r\alpha}(t) - i_{s\alpha}(t) \cdot i_{r\beta}(t)) - m_2 \cdot C_g(t) - m_3 \cdot \omega(t) \end{cases} \quad \text{III.114}
\end{aligned}$$

Pour la fonction d'entrée du système étudié $B(u(t), t)$ est écrite comme suit :

$$B(u(t), t) = \begin{cases} b_1 \cdot v_{s\alpha}(t) - b_2 \cdot v_{r\alpha}(t) \\ b_1 \cdot v_{s\beta}(t) - b_2 \cdot v_{r\beta}(t) \\ -b_2 \cdot v_{s\alpha}(t) + b_3 \cdot v_{r\alpha}(t) \\ -b_2 \cdot v_{s\beta}(t) + b_3 \cdot v_{r\beta}(t) \\ 0 \end{cases} \quad \text{III.115}$$

De plus, la fonction de mesure, est donnée par :

$$h(x(t), t) = \begin{cases} 1 \cdot i_{s\alpha}(t) + 0 \cdot i_{s\beta}(t) + 0 \cdot i_{r\alpha}(t) + 0 \cdot i_{r\beta}(t) + 0 \cdot \omega(t) \\ 0 \cdot i_{s\alpha}(t) + 1 \cdot i_{s\beta}(t) + 0 \cdot i_{r\alpha}(t) + 0 \cdot i_{r\beta}(t) + 0 \cdot \omega(t) \\ 0 \cdot i_{s\alpha}(t) + 0 \cdot i_{s\beta}(t) + 1 \cdot i_{r\alpha}(t) + 0 \cdot i_{r\beta}(t) + 0 \cdot \omega(t) \\ 0 \cdot i_{s\alpha}(t) + 0 \cdot i_{s\beta}(t) + 0 \cdot i_{r\alpha}(t) + 1 \cdot i_{r\beta}(t) + 0 \cdot \omega(t) \\ 0 \cdot i_{s\alpha}(t) + 0 \cdot i_{s\beta}(t) + 0 \cdot i_{r\alpha}(t) + 0 \cdot i_{r\beta}(t) + 1 \cdot \omega(t) \end{cases} \quad \text{III.116}$$

Les constantes $a, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, b_1, b_2, b_3$ sont définies dans la section (III.4.1).

Les constantes m_1, m_2 et m_3 sont données par : $m_1 = m_2 = p/J, m_3 = f/J$

J est le coefficient d'inertie total, f est le coefficient de frottement visqueux.

En analysant la fonction dynamique du système $g(x(t), t)$, nous pouvons déduire que le système de la MADA a un modèle non linéaire, du fait qu'il existe des produits croisés entre des états du système. De plus, le modèle développé de la machine peut être considéré comme étant un modèle variant dans le temps car il dépend de la vitesse angulaire du rotor ω , qui varie en même temps que la vitesse du vent.

Le filtre de Kalman du type UKF que nous allons utiliser étant un système discret il faut donc, au préalable, discrétiser les équations du modèle non linéaire de la MADA. De ce fait, le modèle continu de la MADA est utilisé avec l'intégrateur discret d'Euler suivant : [Shahriari 2016]

$$\dot{x} = \frac{x(k) - x(k-1)}{T_e} \quad \text{III.117}$$

$$x(k) = x(k - 1) + T_e \cdot \dot{x} \quad \text{III.118}$$

T_e : le temps d'échantillonnage

Après discrétisation du modèle non linéaire de la MADA et avec la prise en compte des défauts actionneurs affectant les tensions statoriques et rotoriques de la MADA, le modèle d'état présenté dans l'équation (III.110) devient comme suit :

$$\begin{cases} x(k + 1) = g(x(k), k) + B(u(k), k) + w(k) \\ y(k) = h(x(k), k) + v(k) \end{cases} \quad \text{III.119}$$

En considérant le défaut actionneur, le modèle d'état de la MADA est écrit ainsi :

$$\begin{cases} x(k + 1) = g(x(k), k) + B(u(k), k) + F \cdot f(k) + w(k) \\ y(k) = h(x(k), k) + v(k) \end{cases} \quad \text{III.120}$$

D'où : F est la matrice de défauts de l'actionneur, f est le vecteur de défaut de l'actionneur de exprimé ainsi:

$$f = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]^T \quad \text{III.121}$$

f_1 affecte la tension statorique $v_{s\alpha}$, f_2 affecte la tension statorique $v_{s\beta}$, f_3 affecte la tension rotorique $v_{r\alpha}$ et f_4 affecte la tension rotorique $v_{r\beta}$.

Les tensions du stator de la MADA sont soumises aux défauts du réseau électrique puisque la machine étudiée est directement connectée au réseau via son stator. Alors que les tensions rotoriques sont affectées par les défaillances du convertisseur coté rotor (CCM), à travers lequel les enroulements rotoriques sont liés au réseau. Parmi les problèmes les plus fréquents des réseaux électriques, est le creux de tension. Ce dernier est une diminution brusque de la tension d'alimentation U jusqu'à une valeur inférieure à une valeur seuil (entre 10% et 90%) qui dure environ 1 minute [Ling, 2010]. Plusieurs facteurs peuvent engendrer l'occurrence du creux de tension, nous citons : des courants de démarrage importants, un court-circuit dans le réseau, une déconnexion partielle de l'alimentation, des courants élevés dus à des arcs électriques ou à la saturation des transformateurs.

L'apparition d'un creux de tension imposé par le réseau entraine un courant statorique élevé à cause de l'augmentation du couple magnétique entre le stator et le rotor, ce qui va causer un surcourant dans le rotor et une augmentation de la tension du bus continu et par conséquent l'endommagement des convertisseurs statiques et de la génératrice [Riouch 2013].

Afin de montrer l'impact du creux de tension sur les génératrices d'éoliens, divers recherches et travaux ont été effectués dans cette perspective [J. Martínez. 2011], [Abo-Khalil. 2006], [Morren 2007].

- Détection et Isolation du défaut de creux de tension affectant la MADA de l'éolienne :

Le but de cette section est de mettre en place une approche de diagnostic du défaut de creux de tension de la MADA utilisée en génératrice dans un système éolien. Deux cas de figures sont proposés : d'abord, le diagnostic d'un défaut d'actionneur unique en employant le Schéma d'Observateur Simplifié (SOS) et ensuite un banc d'observateurs structurés selon le Schéma d'Observateur Dédié (DOS) pour la détection et l'isolation de défauts d'actionneurs multiples et simultanés.

a) Cas du défaut actionneur unique :

La première situation correspond à diagnostiquer la présence d'un seul défaut actionneur en utilisant le schéma d'Observateur Simplifié SOS (Simplified Observer Scheme). Ce défaut est détecté par la génération et l'analyse des résidus d'estimation des variables d'état du système MADA à l'aide d'un seul observateur de Kalman non-parfumé (UKF).

Une étape de vérification de la commandabilité ou contrôlabilité du système MADA est nécessaire. La commandabilité est la capacité de trouver une commande $u(t)$ permettant d'amener un système d'un état initial quelconque x_0 à $t = 0$, à un état final quelconque $x_f = x(t_f)$ en un temps fini.

Pour les systèmes LTI, le système est dit commandable si et seulement si le rang de la matrice de commandabilité, donnée par l'équation ci-dessous, est plein :

$$C[A, B] = [B \quad B \cdot A \quad B \cdot A^2 \quad B \cdot A^{n-1}]^T \quad \text{III.122}$$

La contrôlabilité locale (Small Time Local Contrabillity STLC) :

Soit (y_e, u_e) est un point d'équilibre, i.e. $f(y_e, u_e) = 0$. L'état x reste proche de x_e , la commande reste proche à u_e en un temps réduit. Si le système linéarisé $\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u$ est contrôlable, alors $\dot{x} = f(x, u)$ est contrôlable localement pendant un temps réduit au point d'équilibre (x_e, u_e) .

Avec: $A := \frac{\partial f}{\partial x}(x_e, u_e), B := \frac{\partial f}{\partial u}(x_e, u_e)$ sont les matrices Jacobiennes calculées au point d'équilibre. Le système linéarisé est contrôlable si et seulement si la matrice $C[A, B]$ a un rang plein : $\text{rang}\{C[A, B]\} = n$, n est la dimension du vecteur d'état.

Pour le système MADA :

$$A: \frac{\partial g}{\partial x}(0) = \begin{bmatrix} -a_1 & \omega_s & a_3 & 0 & 0 \\ -\omega_s & -a_1 & 0 & a_3 & 0 \\ a_4 & 0 & -a_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_4 & -\omega_s & -a_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -m_3 \end{bmatrix} \quad \text{III.123}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & -b_2 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & -b_2 & 0 \\ -b_2 & 0 & b_3 & 0 & 0 \\ 0 & -b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{III.124}$$

Nous avons obtenu: $\text{rang} [B \quad B \cdot A \quad B \cdot A^2 \quad B \cdot A^3] = 5$, le système MADA est contrôlable.

Le vecteur des résidus est noté r_{SOS} et donné par :

$$\|r_{SOS}\| = \|y - \hat{y}\| \quad \text{III.125}$$

D'où : \hat{y} est le vecteur des états estimés par le filtre de Kalman non parfumé(UKF), exprimé par :

$$\hat{y} = [\hat{i}_{s\alpha} \quad \hat{i}_{s\beta} \quad \hat{i}_{r\alpha} \quad \hat{i}_{r\beta} \quad \hat{\omega}]^T \quad \text{III.126}$$

Alors, le vecteur r_{SOS} peut-être réécrit comme suit:

$$\begin{cases} r_{SOS1} = i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha} \\ r_{SOS2} = i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta} \\ r_{SOS3} = i_{r\alpha} - \hat{i}_{r\alpha} \\ r_{SOS4} = i_{r\beta} - \hat{i}_{r\beta} \end{cases} \quad \text{III.127}$$

En cas d'absence du défaut de l'actionneur, la valeur du signal résiduel est proche de zéro, tandis qu'en cas de panne, la valeur résiduelle devient supérieure à un seuil prédéfini τ , fixé à 3σ ; avec σ étant l'écart type du signal résidu en fonctionnement normal.

Chaque résidu prend une signature binaire : '0' en absence du défaut et '1' présence du défaut. De manière simplifiée, la détection de défauts au niveau d'un résidu est effectuée par application du test logique suivant :

si $|r_{SOSi}| < \tau$ alors aucun défaut actionneur n'est détecté, $i = \{1,2,3,4\}$

si $|r_{SOSi}| \geq \tau$ alors un défaut actionneur est détecté, $i = \{1,2,3,4\}$

La figure suivante présente la structure (SOS) utilisée pour le diagnostic d'un seul défaut actionneur du système MADA :

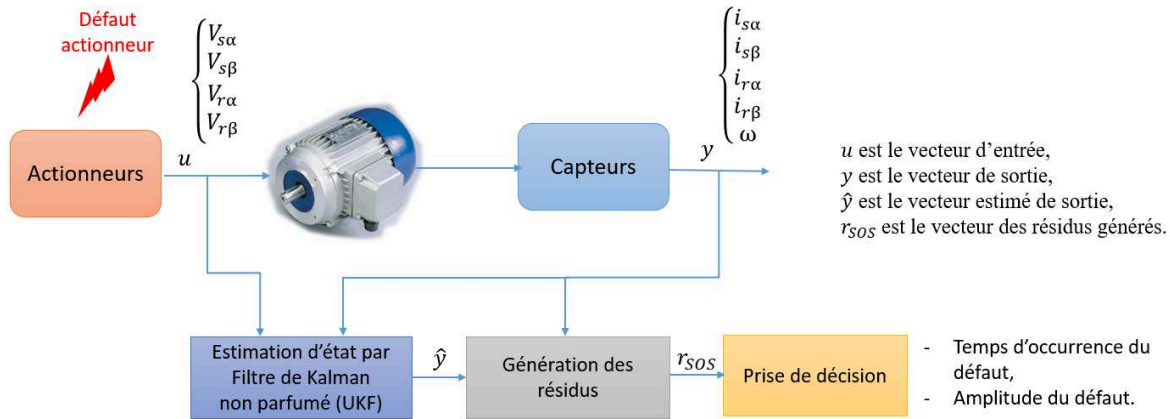


Figure III.68 Diagnostic du défaut actionneur unique - Schéma SOS

b) Cas de défauts actionneurs multiples et simultanés :

En utilisant un observateur dédié (schéma DOS), la détection et l'isolation de défauts multiples et simultanés d'actionneurs est effectuée. Le nombre d'observateurs est égal au nombre d'entrées du système, le $i^{\text{ème}}$ observateur est piloté par la $i^{\text{ème}}$ entrée et toutes les sorties. Les entrées restantes sont considérées comme entrées inconnues et la sortie de ce $i^{\text{ème}}$ observateur est insensible aux défauts des entrées non utilisées pour sa synthèse. Cela veut dire, que les sorties estimées par l'observateur piloté par l'entrée défaillante, divergent des sorties mesurées du système et les autres observateurs pilotés par des entrées sans défaut fournissent de bonnes estimations.

La structure DOS pour le diagnostic des défauts actionneurs multiples et simultanés, est donnée ci-dessous :

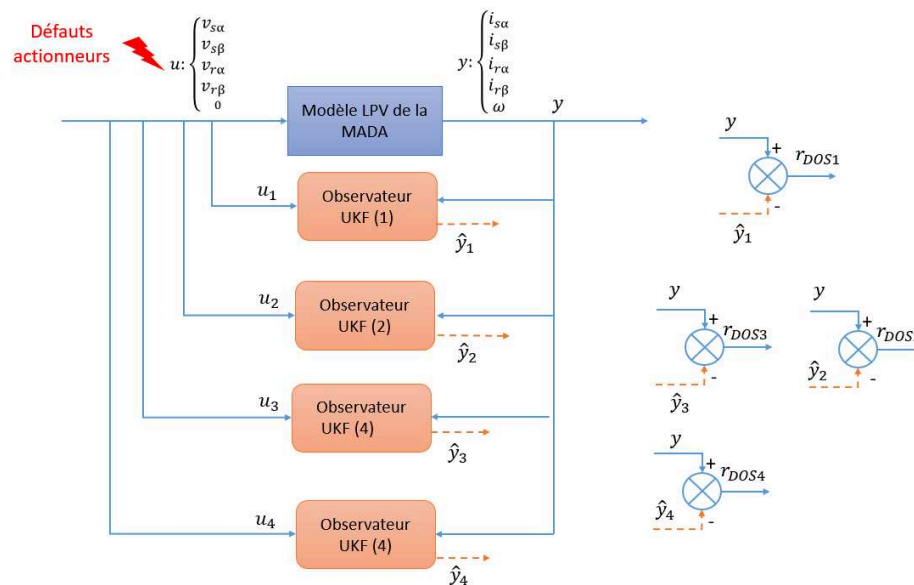


Figure III.69 Diagnostic de défauts actionneurs multiples et simultanés - Structure DOS

D'où :

\hat{y}_i est le vecteur des sorties estimées par chaque observateur, donné par :

$$\hat{y}_i = [\hat{y}_{i,1} \quad \hat{y}_{i,2} \quad \hat{y}_{i,3} \quad \hat{y}_{i,4} \quad \hat{y}_{i,5}]^T, i = \{1,2,3,4\} \quad \text{III.128}$$

Les résidus de chaque observateur sont exprimés ainsi :

$$r_{DOS,i} = \begin{cases} r_{i,1} = y_1 - \hat{y}_{i,1} \\ r_{i,2} = y_2 - \hat{y}_{i,2} \\ r_{i,3} = y_3 - \hat{y}_{i,3} \\ r_{i,4} = y_4 - \hat{y}_{i,4} \\ r_{i,5} = y_5 - \hat{y}_{i,5} \end{cases} ; i = \{1,2,3,4\} \quad \text{III.129}$$

Les résidus générés par les quatre observateurs peuvent être rassemblés dans une matrice notée r_{DOS} et écrite comme suit:

$$r_{DOS} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & r_{1,4} & r_{1,5} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & r_{2,4} & r_{2,5} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & r_{3,4} & r_{3,5} \\ r_{4,1} & r_{4,2} & r_{4,3} & r_{4,4} & r_{4,5} \\ r_{5,1} & r_{5,2} & r_{5,3} & r_{5,4} & r_{5,5} \end{bmatrix} \quad \text{III.130}$$

Le même principe d'analyse de résidus est utilisé dans le cas de génération de résidus à l'aide d'un banc d'observateurs structurés selon le schéma DOS.

- Scénario de défaut actionneur 1 :

Il s'agit d'injecter un défaut actionneur f_1 dans la tension statorique $v_{s\alpha}$. f_1 est un creux de tension (chute de tension) de 20% par rapport à la valeur nominale de $v_{s\alpha}$. Durant le temps de simulation, le défaut f_1 est défini comme suivant :

$$f_1 = \begin{cases} v_{s\alpha} & ; \quad \text{if } t \in [0s, 4s] \\ 20\% \times v_{s\alpha} & ; \quad \text{if } t \in [4s, 5s] \\ v_{s\alpha} & ; \quad \text{if } t \in [5s, 10s] \end{cases} \quad \text{III.131}$$

La tension du stator $v_{s\alpha}$ pendant un défaut de creux de tension f_1 est donnée sur la figure suivante :

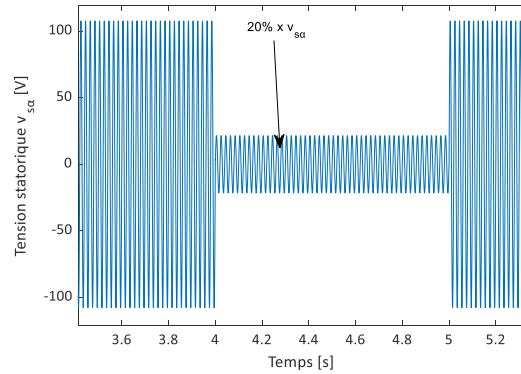


Figure III.70 Zoom sur l'aspect de la tension du stator $v_{s\alpha}$ pendant le défaut f_1

L'influence du défaut actionneur f_1 est observée sur les variables d'état du système MADA, à savoir les courants statoriques et rotoriques et la vitesse angulaire du rotor. Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :

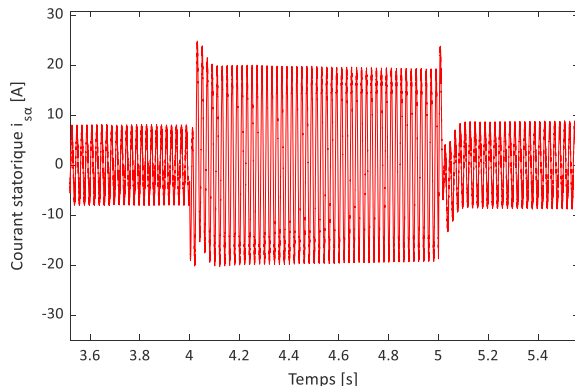


Figure III.71 Zoom sur le courant statorique $i_{s\alpha}$ sous le défaut f_1

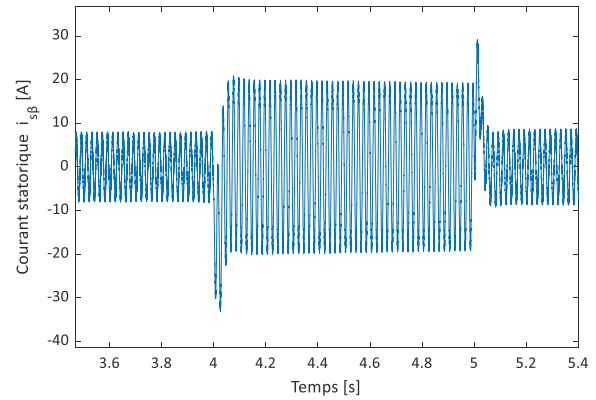


Figure III.72 Zoom sur le courant statorique $i_{s\beta}$ sous le défaut f_1

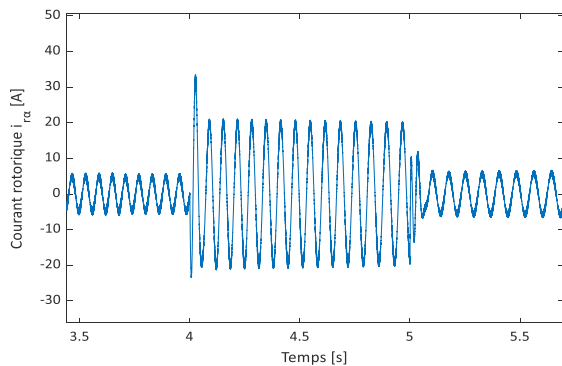


Figure III.73 Zoom sur l'effet du défaut f_1 sur le courant rotorique $i_{r\alpha}$

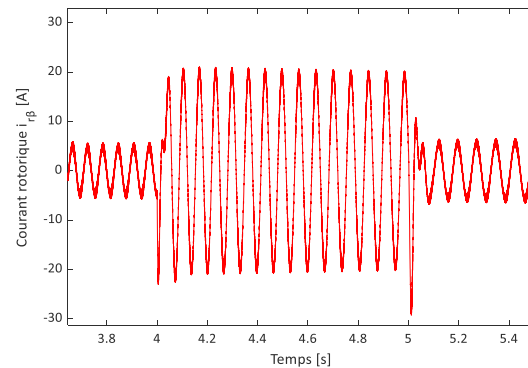


Figure III.74 Zoom sur l'impact du défaut f_1 sur le courant rotorique $i_{r\beta}$

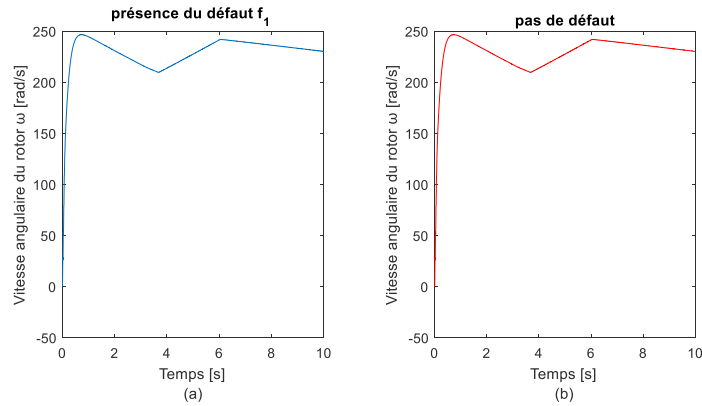


Figure III.75 Vitesse angulaire du rotor de la génératrice : (a)- avec présence du défaut f_1 ; (b)- absence du défaut f_1

D'après les figures ci-dessus, nous pouvons remarquer que lorsqu'une chute de tension survient, des surintensités de courants statoriques et rotoriques sont produites pendant la présence du défaut. Alors que l'allure de la vitesse angulaire du rotor est inchangée en présence et absence du défaut de chute de tension. Nous pouvons conclure que lors d'une chute de tension dans la MADA, les courants du stator et du rotor sont fortement augmentés, ceci risque d'endommager l'ensemble du système (machine, convertisseurs...etc.).

Étant donné que seuls les courants électriques de la machine se sont affectés par le défaut actionneur de chute de tension, la détection de ce type de défaut peut être effectuée sur la base des résidus d'estimation de ces variables d'état selon la structure (SOS) présentée à la figure (III.63). Par conséquent, les signatures résiduelles des courants statoriques et rotoriques, représentés dans le repère fixe diphasé (α, β) sont illustrées comme suit :

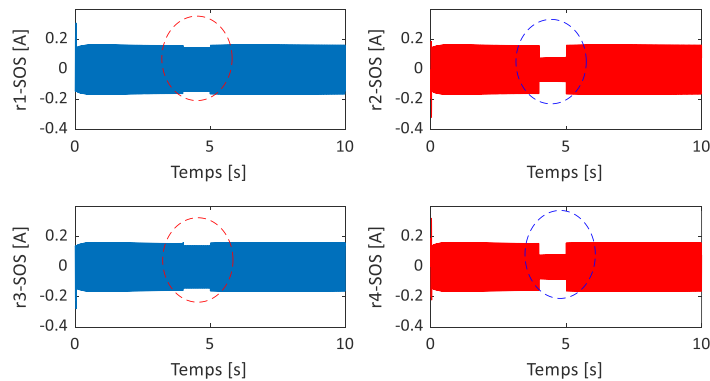


Figure III.76 Les signatures résiduelles pour le premier scénario de défaillance de l'actionneur

En observant cette figure, on peut voir clairement que les quatre résidus détectent la présence du défaut actionneur f_{a1} , de l'instant $t = 4$ [s] jusqu'à l'instant de sa disparition à $t = 5$ [s].

Donc nous ne pouvons pas se baser sur le schéma SOS dans ce cas pour localiser l'entrée défailante. En utilisant la structure DOS, nous obtenons les signaux résiduels suivants :

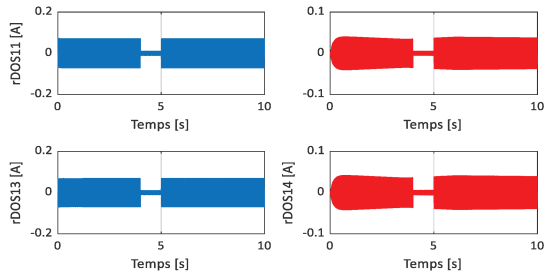


Figure III.77 Résidus de l'observateur UKF (1)

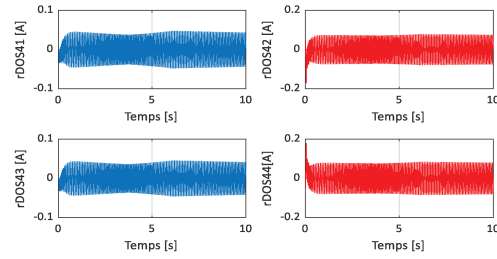


Figure III.78 Résidus de l'observateur UKF (2)

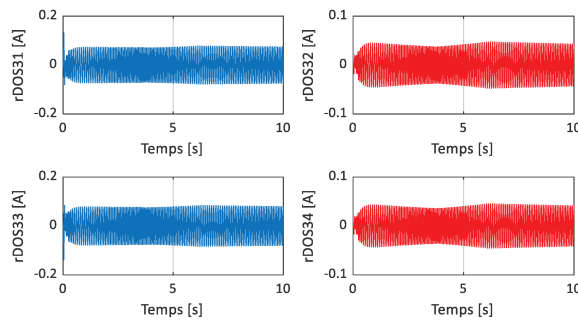


Figure III.79 Résidus de l'observateur UKF (3)

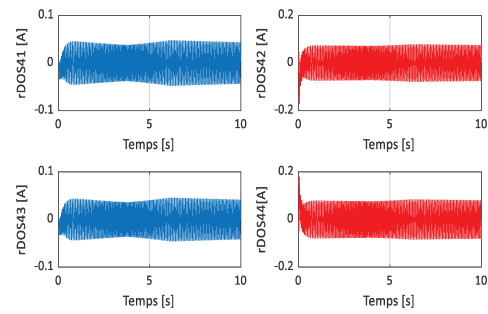


Figure III.80 Résidus de l'observateur UKF (4)

Les résidus donnés par l'observateur UKF (1) nous permet de détecter et localiser le défaut actionneur f_{a1} sur la première entrée qui est la tension statorique $v_{s\alpha}$. Alors que les résidus des autres observateurs ne signalent rien vu que ces derniers sont pilotés par les entrées saines.

- Scénario 2 de défauts actionneurs multiples et simultanés :

Dans l'objectif de résoudre le problème de diagnostic des défaillances multiples et simultanées d'actionneurs dans le système MADA, un deuxième scénario a été appliqué. Il consiste à injecter une chute de tension de 20% à $t = 4 [s]$ et disparaît à $t = 5 [s]$, aussi bien dans la tension statorique $v_{s\alpha}$ que dans la tension rotorique $v_{r\beta}$. Ces défauts sont notés respectivement f_{a1} et f_{a4} sont donnés comme suit:

$$f_{a1} = \begin{cases} v_{s\alpha} & ; \quad si \ t \in [0s, 4s] \\ 20\% \times v_{s\alpha} & ; \quad si \ t \in [4s, 5s] \\ v_{s\alpha} & ; \quad si \ t \in [5s, 10s] \end{cases} \quad \text{III.132}$$

$$f_{a4} = \begin{cases} v_{r\beta} & ; \quad si \ t \in [0s, 4s] \\ 20\% \times v_{r\beta} & ; \quad si \ t \in [4s, 5s] \\ v_{r\beta} & ; \quad si \ t \in [5s, 10s] \end{cases} \quad \text{III.133}$$

Un zoom sur les deux tensions statoriques $v_{s\alpha}$ et $v_{r\beta}$ est effectué pour représenter les deux défauts injectés simultanément, ceci est présenté sur les deux figure suivantes :

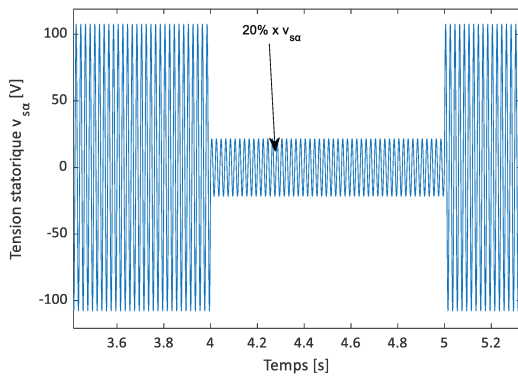


Figure III.81 Zoom sur l'aspect de la tension du stator $v_{s\alpha}$ pendant le défaut f_{a1}

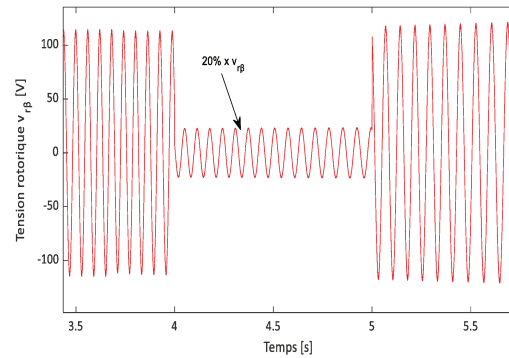


Figure III.82 Zoom sur l'allure de la tension du stator $v_{r\beta}$ pendant le défaut f_{a4}

Pour l'étape de détection et de localisation des défauts actionneurs multiples et simultanés, la structure DOS présentée dans la figure (III.69) est utilisée et les résidus obtenus sont illustrés dans les figures ci-dessous :

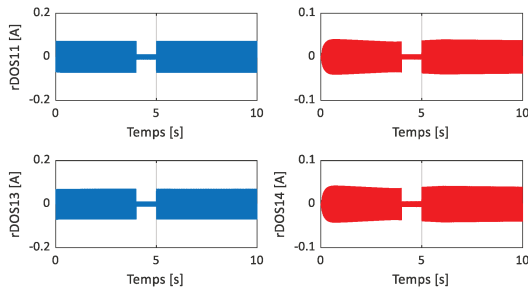


Figure III.83 Résidus de l'observateur UKF (1)

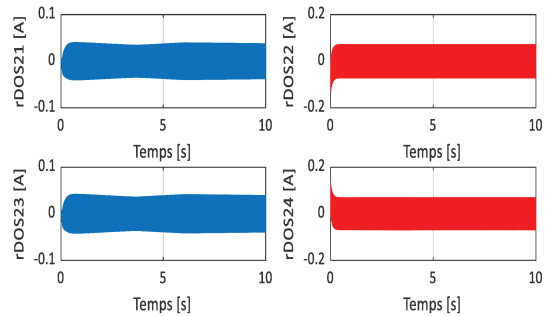


Figure III.84 Résidus de l'observateur UKF (2)

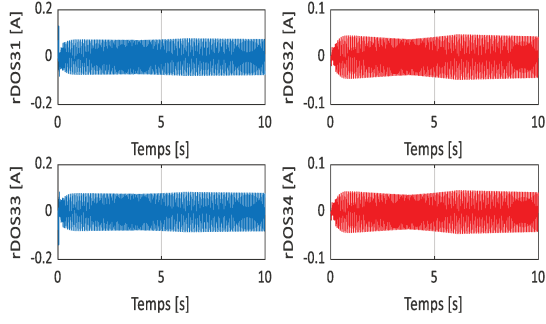


Figure III.85 Résidus de l'observateur UKF (3)

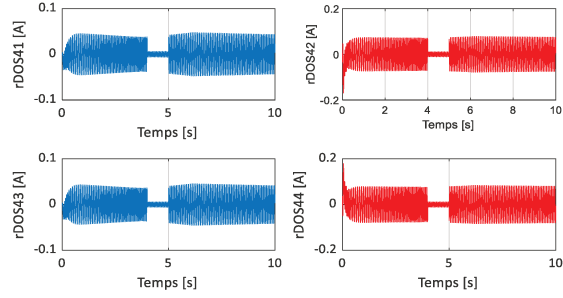


Figure III.86 Résidus de l'observateur UKF (4)

Ces résultats de simulation montrent que les résidus des observateurs UKF (1) et (4), pilotés par les entrées défailtantes, détectent la présence des défauts actionneurs étudiés sur tous les signaux de sortie. Tandis que les valeurs des signaux résiduels des observateurs (2) et (3) ne signalent rien. D'après ces résultats, nous pouvons conclure qu'un défaut actionneur, est présent sur la première et la quatrième entrée du système, ce qui induit à des estimations erronées. ces deux défauts actionneurs durent de l'instant $t = 4 [s]$ jusqu'à l'instant $t = 5 [s]$.

Dans ce qui suit, nous allons considérer un troisième scénario, qui vise à montrer l'efficacité de l'approche pour le diagnostic des défauts actionneurs multiples et qui ne sont pas simultanés. Ce scénario consiste à injecter une chute de tension de 20% à $t = 4 [s]$ et disparaître à $t = 5 [s]$, dans la tension statorique $v_{s\beta}$ et une chute de tension de 20% à $t = 6 [s]$ et disparaître à $t = 7 [s]$ dans la tension rotorique $v_{r\beta}$. Ces défauts sont notés respectivement f_{a2} et f_{a4} sont donnés comme suit:

$$f_{a2} = \begin{cases} v_{s\beta} & ; \quad si \ t \in [0s, 4s] \\ 20\% \times v_{s\beta} & ; \quad si \ t \in [4s, 5s] \\ v_{s\beta} & ; \quad si \ t \in [5s, 10s] \end{cases} \quad \text{III.134}$$

$$f_{a4} = \begin{cases} v_{r\beta} & ; \quad si \ t \in [0s, 6s] \\ 20\% \times v_{r\beta} & ; \quad si \ t \in [6s, 7s] \\ v_{r\beta} & ; \quad si \ t \in [7s, 10s] \end{cases} \quad \text{III.135}$$

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :

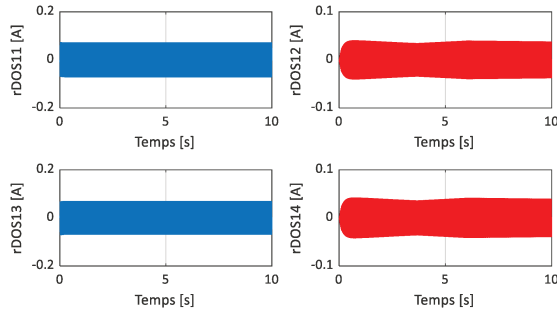


Figure III.87 Résidus de l'observateur UKF (1)

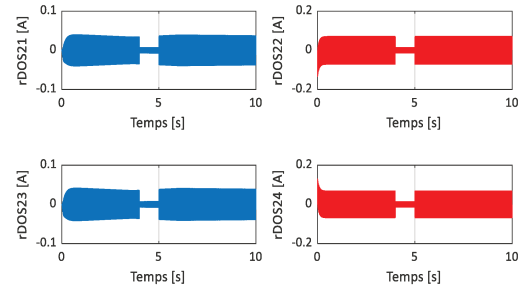


Figure III.88 Résidus de l'observateur UKF (2)

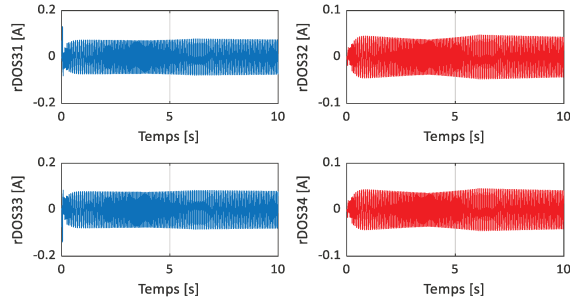


Figure III.89 Résidus de l'observateur UKF (3)

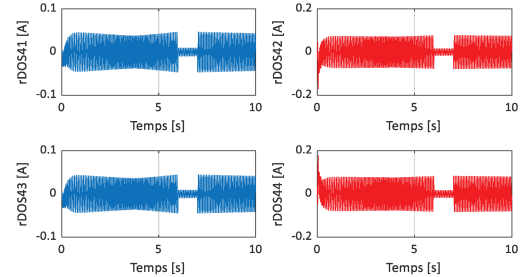


Figure III.90 Résidus de l'observateur UKF (4)

La même remarque peut se faire en analysant ces résidus, l'observateur (2) et (4) pilotés par les entrées défectueuses donnent de mauvaises estimations et détectent la présence des défauts actionneurs. L'observateur UKF (2) détecte la présence du défaut actionneur f_{a2} sur tous les signaux des résidus entre les instants $t = 4s$ et $t = 5s$, alors que l'observateur (4) détecte la présence du défaut f_{a4} entre les instants $t = 6s$ et $t = 7s$. Les résidus des autres observateurs (1) et (3) ne signalent rien, ceci est expliqué par le fait qu'ils sont pilotés par des entrées saines.

À cet effet nous pouvons conclure que la structure DOS des observateurs UKF se montre efficace pour la détection et la localisation des défauts actionneurs multiples et simultanés.

III.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré, dans un premier temps, au diagnostic des défauts capteurs de courant de la machine asynchrone doublement alimentée, utilisée en génératrice dans un système éolien à vitesse variable. Au diagnostic des défauts composants de la MADA, dans un deuxième temps, à savoir le court-circuit inter-spores des enroulements statoriques et la variation des valeurs des résistances rotoriques et statoriques suite à l'augmentation de la température et enfin au diagnostic des défauts actionneurs de la MADA, le défaut de creux de tension a été traité.

L'objectif a été de mettre en œuvre une technique de diagnostic de ces défauts par la conception et l'utilisation du filtre de Kalman linéaire et ses variantes non linéaires : Filtre de Kalman Etendu (FKE) et le Filtre de Kalman sans-parfum (UKF), vu leur robustesse et leur précision d'estimation.

Selon le type du défaut, qu'il soit unique ou multiples, les structures d'Observateur Simplifié (SOS) et le Schéma d'Observateur Dédié (DOS) et Généralisé (GOS) ont été utilisé lors de l'étape de détection et la localisation des défauts. En ce qui concerne, l'étape d'évaluation des résidus, le test statistique Page-Hinkley a été appliqué.

Les résultats de simulation ont montré les performances des techniques de diagnostic proposées pour effectuer la détection et la localisation des défauts capteurs, des défauts composants et des défauts actionneurs.

CONCLUSION & PERSPECTIVES

Les travaux de recherche réalisés au cours de cette thèse avaient pour objectif l'élaboration des approches de diagnostic des défauts de la MADA d'une éolienne, en utilisant les filtres de Kalman.

Dans un premier temps, nous avons présenté un état de l'art sur la situation du marché éolien mondial, européen et marocain. Nous avons donc constaté que ces marchés subissent une grande expansion et que l'énergie éolienne bénéficie d'un intérêt croissant dans ces régions, en particulier pour la production de l'électricité. Ensuite, pour se familiariser avec le domaine de l'énergie éolienne, nous avons défini quelques notions élémentaires et nous avons décrit davantage le principe de fonctionnement des éoliennes, leurs types et leur constitution. Aussi, un état de l'art sur les méthodes de diagnostic des défauts des systèmes industriels a été réalisé.

Vu les avantages énormes qu'apporte l'élaboration des méthodes de diagnostic à base de modèle, tels que : la simplicité, la réduction des coûts importants et de l'espace supplémentaire nécessaire pour l'implantation de la redondance physique (ou matérielle), la fiabilité de détection et de localisation des défauts ; nous avons choisi d'utiliser les méthodes à base de modèle analytique pour le diagnostic des défauts de la MADA.

L'élaboration des méthodes de diagnostic à base de modèle, requiert une étape préliminaire de modélisation analytique du système. De ce fait, nous avons, dans un second temps, modélisé à l'aide d'équations mathématiques et simulé virtuellement et avec un temps relativement court, le fonctionnement de toute la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, y compris la MADA, dans le logiciel MATLAB & Simulink. Les signaux issus des simulations ont été exploités par la suite pour l'élaboration des techniques de diagnostic de défauts de la MADA.

Le diagnostic des défauts basé sur l'utilisation des modèles repose sur deux grandes étapes principales : la génération de résidus et la prise de décision. Nous nous sommes intéressés aux filtres de Kalman pour générer les résidus permettant la détection de la présence desdits défauts. En effet, le filtre de Kalman modifié du type LPV a été utilisé dans le cas du modèle d'état linéaire à paramètre variant de la MADA, alors que les filtres de Kalman étendu (EKF : Extended Kalman Filter) et sans-parfum (UKF : Unscented Kalman Filter) ont été utilisés en tenant compte de la non linéarité du modèle mathématique de celle-ci. Pour la localisation des défauts simples, nous avons utilisé le Schéma d'Observateur Simplifié (SOS : Simplified Observer Scheme) et pour les défauts multiples et simultanés, les résidus ont été structurés suivant le Schéma d'Observateur Dédié (DOS : Dedicated Observer Scheme) et le Schéma d'Observateur Généralisé (GOS : Generalized Observer Scheme). L'isolation des défauts est effectuée par l'analyse des résidus générés par le moyen du test statistique Page-Hinkley (P-H).

Les résultats de simulation obtenus ont montré les performances des techniques de diagnostic proposées pour détecter la présence ou non d'un défaut, son instant d'apparition et son emplacement. Les défauts capteurs du type additif, les défauts actionneurs (creux de tension) et les

défauts composants (court-circuit inter-spires et variation des valeurs nominales des résistances des enroulements) ont été étudiés.

Les résultats obtenus à l'issue de ce travail de recherche peuvent être améliorés et perfectionnés aussi bien sur le plan méthodologique que sur le plan applicatif et pragmatique, et ceci en envisageant des travaux futurs. Les perspectives de ce travail peuvent porter sur :

- L'étude élargie à d'autres types de défauts (électriques ou mécaniques) de la MADA et mettre en exergue leur effet sur le reste des composants de la machine.
- La prise en compte des défauts du Convertisseur Côté Machine (CCM) et du Convertisseur Côté Réseau (CCR), auxquels la MADA est couplée dans la structure Scherbius du système éolien étudié.
- Améliorer la précision du modèle analytique de la machine en réduisant les hypothèses simplificatrices telles que : Entrefer constant, Effet des encoches négligé, Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante, Pertes ferromagnétiques négligeables...etc.
- Implémenter les approches de diagnostic proposées et le modèle analytique de la MADA sur un banc d'essais réel, en vue de confronter les résultats de simulation avec ceux obtenus des expérimentations et aussi en vue de discerner entre les différents comportements de la machine dans les deux cas de fonctionnement sain et défaillant.

LISTE DES PUBLICATIONS

- **Communications internationales avec comité de lecture et publications des actes :**

I. Idrissi, H. Chafouk, R. El Bachtiri, Yassine Boukili, “LPV Modeling and Simulation of DFIG for Wind Turbine”, présentée à ‘the International Conference on Renewable Energies and Energy Efficiency (REEE’2017)’, Faculté des Sciences et Techniques, Fès, Maroc, 8 & 9 Novembre 2017.

I. Idrissi, R. El Bachtiri, “Simulated and Experimental Determination of the Regulation Curve of an Asynchronous Generator for Wind Turbine”, présentée à ‘the 10th International Conference on Optics, Information Processing and Renewable Energy (ICOIPRE’2018)’, Faculté des Sciences de Kénitra, Kénitra, Maroc, 22-23 Novembre 2018.

I. Idrissi, R. El Bachtiri, H. Chafouk, M. Khanfara, “Fault Diagnosis of Stator Inter-Turn Short Circuit in Doubly Fed Induction Generator of Wind Turbine”, présentée à ‘6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies’, Paris, France, du 23-26 Avril 2019.

I. Idrissi, H. Chafouk, R. El Bachtiri, “Actuator Fault Diagnosis Approach for Doubly Fed Induction Generator of Wind Turbine”, présentée à ‘4th International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysToL’2019)’, Casablanca, Maroc, du 18- 20 Septembre 2019.

- **Reuves internationales :**

I. Idrissi, H. Chafouk, R. El bachtiri, M. Khanfara, “Bank of Extended Kalman Filters for Faults Diagnosis in Wind Turbine Doubly Fed Induction Generator”, in TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), Vol.16, No.6, December 2018, pp.2954~2966. ISSN: 1693-6930 (SJR 2017: 0.265 (Q3), CiteScore 2017: 0.63, SNIP 2017: 0.580)

I. Idrissi, R. El bachtiri, H. Chafouk, “A Bank of Kalman Filters for Current Sensors Faults Detection and Isolation of DFIG for Wind Turbine”, présentée à ‘5th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC’2017), Décembre 2017, Tanger, Maroc, 10.1109/IRSEC.2017.8477263 ©2018 IEEE.

- **Communications nationales :**

Imane Idrissi, Houcine Chafouk, Rachid El Bachtiri, “ Early Fault Prediction of DFIG Wind Energy System Based on External Environmental Factors ”, présentée par affiche aux XIIème Journées Maghrébines des Sciences des Matériaux JMSM’2015, le 19 Novembre 2015, Faculté des Sciences et Techniques (FST), Fès, Maroc,

Imane Idrissi, Houcine Chafouk, Rachid El Bachtiri, “Diagnostic des défauts d’une Génératrice Asynchrone à Double Alimentations à vitesse de rotation fixe dans une éolienne”, présentée par affiche à la 1^{ère} rencontre des jeunes chercheurs en sciences de l’ingénieur de l’USMBA & 5ème édition de la journée des doctorants du LSSC, le 22 Décembre 2015, FST, Fès, Maroc

Imane Idrissi, Houcine Chafouk, Rachid El Bachtiri, “ Diagnostic des Défauts Capteurs de Courant de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) d'une Éolienne par l'Observateur de Kalman ”, présenté par affiche à la 2ème Rencontre Nationale des Jeunes Chercheurs en Sciences de l'Ingénieur & 6ème édition de la Journée des Doctorants du LSSC, le 20 décembre 2016, FST, Fès, Maroc.

Imane Idrissi, Houcine Chafouk, Rachid El Bachtiri, “Commande basée sur l'Observateur pour un système de conversion d'énergie éolienne”, présentée par affiche au Workshop on Innovation and Emergent Technologies, le 13 Décembre 2017 à l'ENSA, Fès-Maroc.

ANNEXES

ANNEXE A Calcul des régulateurs PI

- Régulation de la vitesse de la MADA par un régulateur PI :

Pour s'assurer que la vitesse de la MADA suit la consigne, un régulateur du type PI (Proportionnel Intégral) est utilisé. Ce régulateur est le plus employé en industrie car il est facile à mettre en œuvre, il permet de contrôler la précision et la rapidité des systèmes asservis et il assure une meilleure robustesse vis-à-vis des perturbations internes ou externes. Cependant, les paramètres de ce régulateur dépendent des paramètres du système à réguler donc une estimation précise de ceux-ci est nécessaire pour obtenir de bonnes performances. La figure suivante montre le schéma bloc de la boucle de régulation de la vitesse de la MADA.

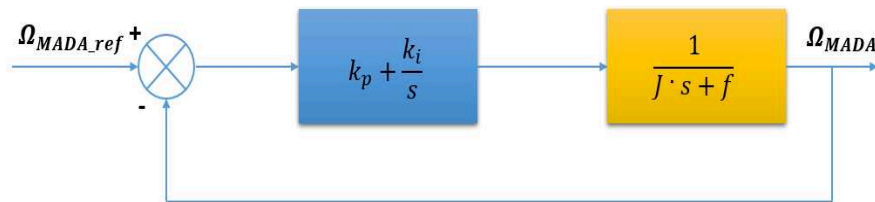


Figure A.1 Régulation de la vitesse de la MADA avec régulateur PI

Soit le régulateur PI utilisé de fonction de transfert :

$$PI(s) = k_i + \frac{k_p}{s} \quad A.1$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure ci-dessus est :

$$FTBO = \frac{k_p \cdot s + k_i}{s} \cdot \frac{1}{J \cdot s + f} \quad A.2$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par la formule suivante :

$$FTBF = \frac{\frac{k_p \cdot s + k_i}{J}}{s^2 + \frac{f}{J} \cdot s + \frac{k_p \cdot s + k_i}{J}} \quad A.3$$

Par définition, la pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont donnés respectivement par :

$$w_n^2 = \frac{k_i}{J} \implies w_n = \sqrt{\frac{k_i}{J}} \quad A.4$$

Et :

$$\xi = \frac{k_p + f}{2 \cdot \omega_n \cdot J} \quad \text{A.5}$$

Donc, les paramètres du régulateur PI sont déduites des équations ci-dessus :

$$k_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot J \cdot f \text{ et } k_i = J \cdot \omega_n^2 \quad \text{A.6}$$

Selon [Krafczyk 2013], les valeurs de la pulsation propre et du facteur d'amortissement sont les suivants :

Le facteur d'amortissement choisi permet de connaître le temps de réponse réduit optimal $T_{r_réduit} = 3 : \xi = 0.707$

La pulsation propre ω_n est déterminée à l'aide de la connaissance du temps de réponse réduit et du temps de réponse imposé $T_{r_imposé} = 100 \text{ ms}$ (dans la bande de 5%) : $\omega_n = \frac{T_{r_réduit}}{T_{r_imposé}} = \frac{3}{0.1}$

- Régulation des courants rotoriques d'axes direct 'd' et quadrature 'q' :

Le schéma bloc simplifié pour la synthèse des régulateurs PI des courants rotoriques de la MADA, est présenté sur la figure suivante :

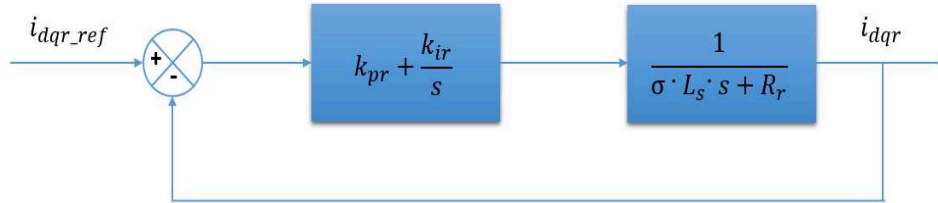


Figure A.2 Schéma bloc des régulateurs PI

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) est donnée par :

$$FTBO = k_{ir} \cdot \left(\frac{1 + \frac{k_{pr}}{k_{ir}} \cdot s}{s} \right) \cdot \left(\frac{\frac{1}{R_r}}{1 + \frac{\sigma \cdot L_r}{R_r} \cdot s} \right) \quad \text{A.7}$$

Dans le but de supprimer le zéro dans la fonction de transfert, nous utilisons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse des correcteurs, ce qui traduit par :

$$\frac{k_{pr}}{k_{ir}} = \frac{\sigma \cdot L_r}{R_r} \quad \text{A.8}$$

La FTBO devient alors :

$$FTBO = \frac{k_{ir}}{R_r \cdot s} \quad \text{A.9}$$

La Fonction de Transfert en Boucle Fermée (FTBF) est exprimée comme suit :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{R_r}{k_{ir}} \cdot s} \quad \text{A.10}$$

Le temps de réponse t_r permet d'atteindre 95% de la valeur de référence du système. Donc, les coefficients des correcteurs PI s'expriment en fonction du temps de réponse des paramètres de la MADA :

$$k_{pr} = \frac{3 \cdot \sigma \cdot L_r}{t_r}$$

$$k_{ir} = \frac{3 \cdot R_r}{t_r} \quad \text{A.11}$$

- Régulation de la puissance statorique réactive :

Le schéma bloc de la boucle de régulation de la puissance réactive par le moyen d'un régulateur PI est présenté sur la figure suivante :

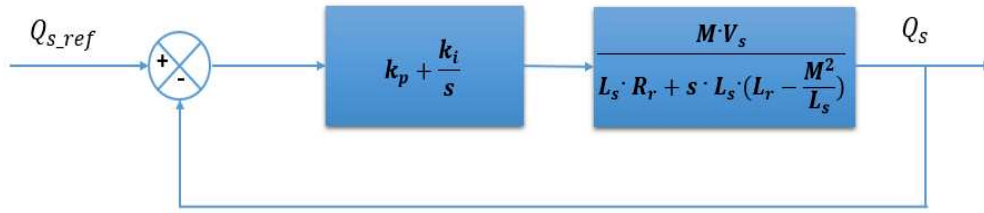


Figure A.3 Schéma bloc de puissance d'un Régulateur PI

La fonction de transfère en boucle ouvert est :

$$FTBO = \frac{M \cdot V_s \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{s \cdot [L_s \cdot R_r + s \cdot L_s \cdot (L_r - \frac{M^2}{L_s})]} \quad \text{A.12}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF = \frac{M \cdot V_s \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{s \cdot [L_s \cdot R_r + s \cdot L_s \cdot (L_r - \frac{M^2}{L_s})]} \quad \text{A.13}$$

$$FTBF = \frac{\frac{M \cdot V_s \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{L_s \cdot (L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s^2 + \frac{s \cdot (L_s \cdot R_r + M \cdot V_s \cdot k_p)}{L_s \cdot (L_r - \frac{M^2}{L_s})} + \frac{M \cdot V_s \cdot k_i}{L_s \cdot (L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad \text{A.14}$$

La fonction de transfert d'un système d'ordre 2, est donnée par l'équation suivante :

$$FTBF = \frac{K \cdot w_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot w_n \cdot s + w_n^2} \quad A.15$$

Par identification de l'équation (A.15) avec l'équation (A.14), on obtient :

$$k_p = \frac{2 \cdot \xi \cdot w_n \cdot L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) - L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad A.16$$

$$w_n^2 = \frac{M \cdot V_s \cdot k_i}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad A.17$$

$$k_i = \frac{w_n^2 \cdot L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M \cdot V_s} \quad A.18$$

ANNEXE B Transformation de Clark et de Concordia

Généralement deux transformations sont confondues, qui sont : la transformation de Clarke et la transformation de Concordia. Elles permettent de minimiser le nombre des variables d'état du système équilibré triphasé et de les écrire dans un repère diphasé fixe. La transformation de Clarke notée C_{32} ne conserve pas la puissance et le couple du système initial mais elle conserve l'amplitude, elle est donnée par :

$$X_{\alpha\beta} = C_{32}^T \cdot X_{abc} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad B.1$$

Quant à la transformation de Concordia, notée T_{32} , elle conserve les puissances actives et réactives du système initial. Cette transformation est la plus utilisée car elle simplifie les opérations matricielles à cause de symétrie de transformation directe et inverse. Elle est exprimée ainsi :

$$X_{\alpha\beta} = T_{32}^T \cdot X_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad B.2$$

Pour passer du repère stationnaire $\alpha\beta$ vers le repère tournant dq, nous appliquons la transformation de rotation directe d'angle θ , définie par :

$$X_{dq} = P(\theta) \cdot X_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \text{B.3}$$

Avec : θ est l'angle entre le repère dq et le repère fixe $\alpha\beta$ suivant le sens trigonométrique.

La transformation inverse permettant le passage du repère dq vers le repère $\alpha\beta$ est donnée par la relation suivante :

$$X_{\alpha\beta} = [P(\theta)]^{-1} \cdot X_{dq} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad \text{B.4}$$

ANNEXE C Modèle Analytique de l'éolienne sous Matlab & Simulink

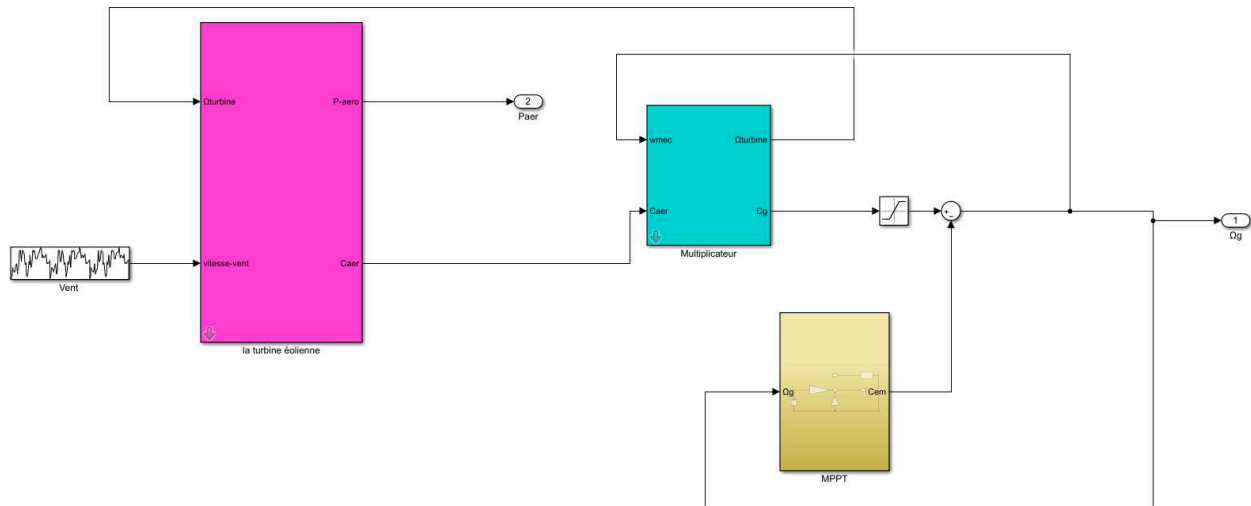


Figure C.1 Partie aérodynamique et mécanique (multiplicateur) de l'éolienne

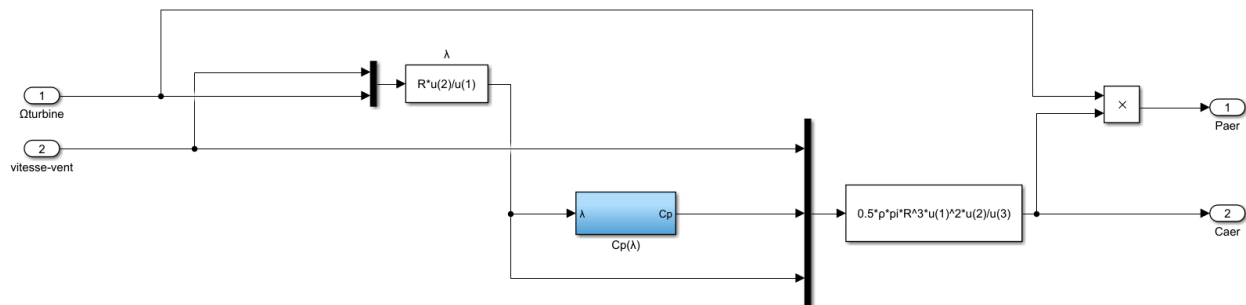


Figure C.2 Schéma Simulink de la turbine

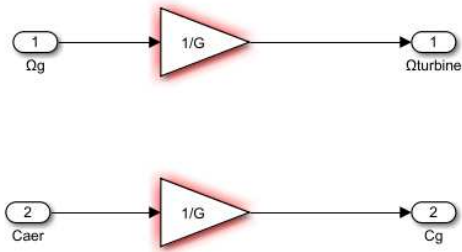


Figure C.3 Schéma Simulink du multiplicateur

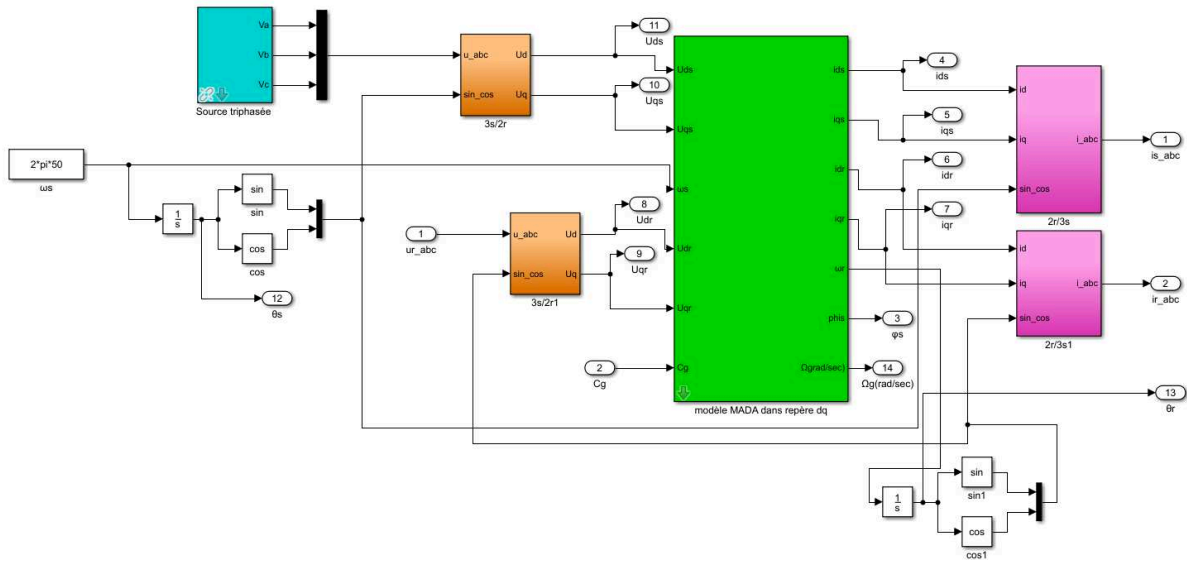


Figure C.4 Partie électrique de l'éolienne

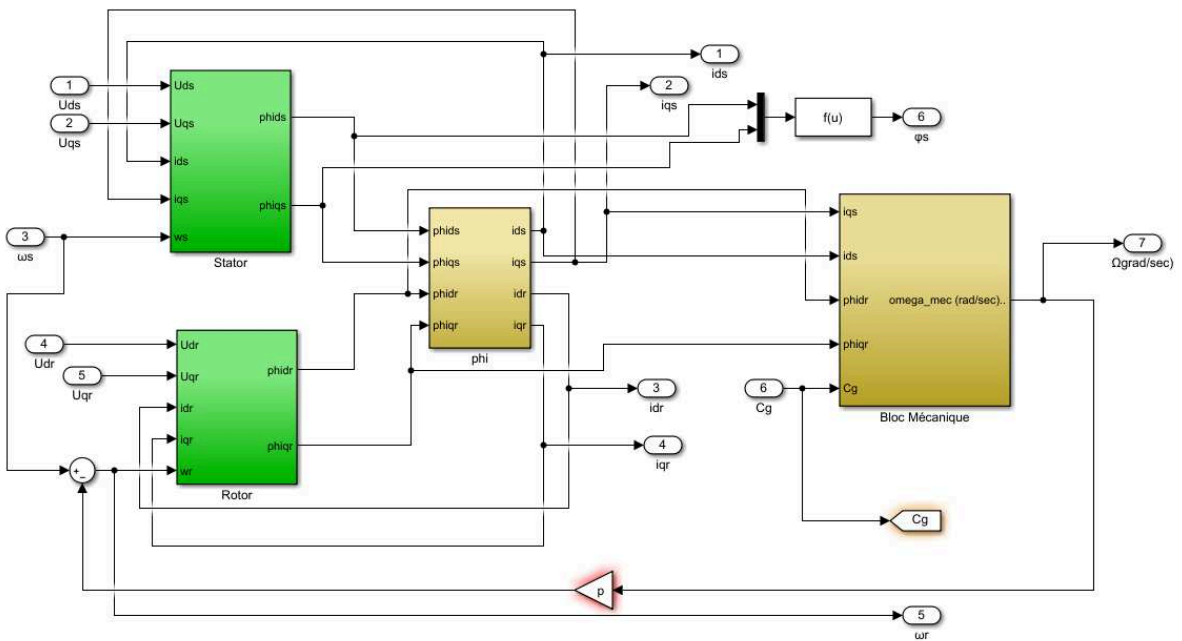


Figure C.5 Schéma Simulink de la MADA dans le repère (d, q)

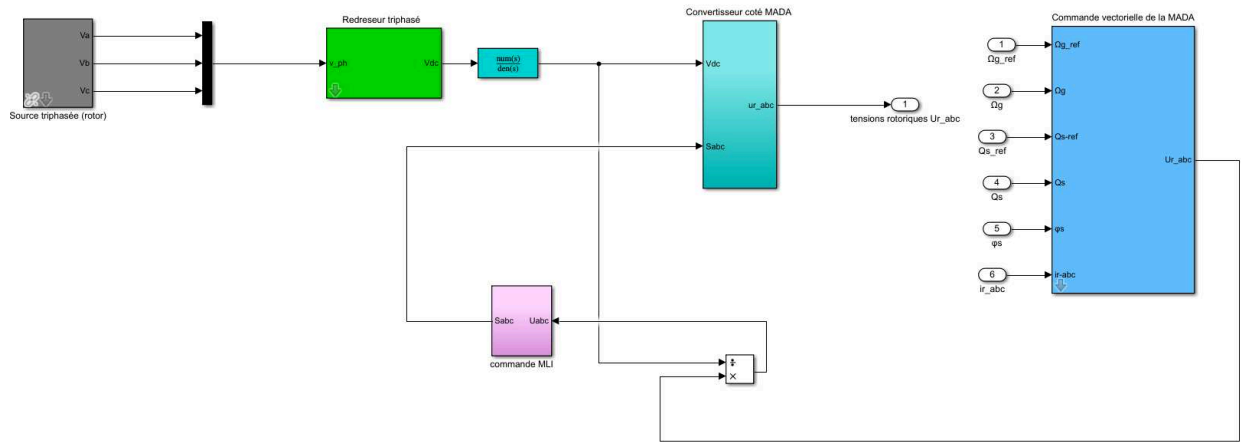


Figure C.6 Partie contrôle du rotor de la MADA et contrôle MLI des convertisseurs

BIBLIOGRAPHIE

-A-

[**Abo-Khalil. 2006**] A. G. Abo-Khalil, D. C. Lee and S. H. Lee, "Grid Connection of Doubly Fed Induction Generators in Wind Energy Conversion System, 'Power Electronics and Motion Control Conference CES/IEEE, 2006.

[**Ackermann 2005**] T. Ackermann, « Wind power in power systems »; John Wiley and Sons, Ltd, Londres, 2005.

[**Aguglia et al. 2010**] Aguglia, Davide, Philippe Viarouge, René Wamkeue, and Jérôme Cros. 2010. "Determination of Fault Operation Dynamical Constraints for the Design of Wind Turbine DFIG Drives." *Mathematics and Computers in Simulation* 81(2): 252–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matcom.2010.05.001>.

[**Aimani 2004**] EL AIMANI, Salma. Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. 2004. Thèse de doctorat. École Centrale de Lille.

[**altaeros 2019**] altaeros (2019) The SuperTower ST200. Available at: <http://www.alt aeros.com/index.html>.

[**Ameziane 2009**] AMEZIANE, Sadek. Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien. 2009. Thèse de doctorat. Univ-bouira. Dz ; Université Bouira ; univ bouira.

[**Ansari et al. 2009**] Ansari, Fahim Md, Atif Iqbal, S. Chatterji, and Anis Afzal. 2009. "Control of MPPT for Photovoltaic Systems Using Advanced Algorithm EPP." 2009 International Conference on Power Systems, ICPS '09 (25): 25–30.

[**Armeni 2009**] S. Armeni, A. Casavola and E. Mosca. Robust fault detection and isolation for LPV systems under a sensitivity constraint. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 23(7):55–72, 2009

[**Attoui 2015**] ATOUI, Issam. Contribution au Diagnostic de Défauts d'une Génératrice Asynchrone dans une Chaîne de Conversion d'Énergie Éolienne. 2015. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar de Annaba.

[**Aubert 2014**] Aubert, B. (2014) 'Détection Des Courts-Circuits Inter-Spires Dans Les Générateurs Synchrones à Aimants Permanents : Méthodes Basées Modèles Et Filtre De Kalman Étendu'.

[**Ayoub 2013**] AYOUB, Tarik. Analyse et commande quatre quadrants de la machine asynchrone à double alimentation. 2013. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

[**Azad 2011**] Azad, S. P., & Tate, J. E. (2011, March). Parameter estimation of doubly fed induction generator driven by wind turbine. In 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (pp. 1-8). IEEE.

[**Azzouz 2015**] AZZOUZ, Tamaarat. Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. 2015. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.

-B-

[**Ba 2010**] BA, Amadou. Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier. 2010. Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech.

[**Basseville 1987**] Basseville M., Benveniste A., Moustakides V., Rougée A., Detection and diagnosis of changes in the eigenstructure of nonstationary multivariable systems, *Automatica*, vol. 23, pp. 479-789, 1987

[**Basseville 1988**] Basseville, M. Detecting changes in signals and systems -A survey. *Automatica*, vol. 24 (3), pp. 309-326, 1988

[**Basseville 1997**] Basseville, M. Information criteria for residual generation and fault detection and isolation. *Automatica*, vol. 33 (5), pp. 783-803, 1997

[**Bechouche 2013**] A. Bechouche, « Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : application à une éolienne » ; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, Avril 2013.

[**Benveniste 1987**] Benveniste A., Basseville M., Moustakides G., The asymptotic local approach to change detection and modal validation, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-32, pp. 583-592, 1987

[**Bonnett 2008**] Bonnett, A. H. and Yung, C. (2008) 'Increased efficiency versus increased reliability', *IEEE Industry Applications Magazine*, 14(1), pp. 29–36. doi: 10.1021/ja01581a644.

[**BOUFERTELLA 2018**] BOUFERTELLA A., CHAFOUK H., BOUDOUR M., « Edge Detection in Wind Turbine Power System based DFIG Using Fault Detection and Isolation FDI », the 10th IFAC Symposium on *Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, SAFEPROCESS 2018, Warsaw, Poland, August 2018.*

[Boukhamkham 2011] BOUKHAMKHAM, Hassen. Diagnostique des défaillances dans une machine asynchrone utilisée dans une chaîne éolienne. 2011. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra. République Algérienne Démocratique et Populaire.

[BOUSSETTA 2016] BOUSSETTA, Mohammed, ELBACHTIRI, Rachid, ELHAMMOUMI, Karima, et al. OPTIMAL SIZING OF GRID-CONNECTED PV-WIND SYSTEM CASE STUDY: AGRICULTURAL FARM IN MOROCCO. Journal of Theoretical & Applied Information Technology, 2016, vol. 86, no 2.

[BOUSSETTA 2017] BOUSSETTA, M., EL BACHTIRI, R., KHANFARA, M., et al. Assessing the potential of hybrid PV–Wind systems to cover public facilities loads under different Moroccan climate conditions. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2017, vol. 22, p. 74-82.

[Boyette 2006] Boyette, A. "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne". Thèse de doctorat, Université d'Henri Poincaré, Nancy 1. 2006

-C-

[Camblong 2003] Camblong, Haritza. Minimisation of the wind perturbations impact on the generation of electricity by variable speed wind turbines. 2003. Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech.

[Caron 1995] CARON, Jean-Pierre et HAUTIER, Jean-Paul. Modélisation et commande de la machine asynchrone. Paris: Technip, 1995.

[Casavola 2007] A. Casavola, D. Famularo, G. Franze and M. Sorbara. A fault detection filter design method for linear parameter- varying systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 221(6) (11):865–874, 2007

[CHAFOUK 2007b] CHAFOUK H., HOBLOS G., LANGLOIS N., LE GONIDEC S., RAGOT J., Soft Computing Approach for Data Validation, Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, vol. 4, n°1, 628-635, 2007

[Chafouk 2015] CHAFOUK, Houcine et OUYESSAAD, Hakim. Fault detection and isolation in DFIG driven by a wind turbine. IFAC-PapersOnLine, 2015, vol. 48, no 21, p. 251-256.

[Chafouk 2016] Chafouk Houcine, Rapport 'état de l'Art des Méthodes de Diagnostic. 2016

[Chahmi, A. 2017] Abdelghani Chahmi 'Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic' Thèse de doctorat , 2017, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

Mohamed-Boudiaf , Algérie.

[Chang 1995] C. T. Chang and J. W. Chen, "Implementation issues concerning the EKF-based fault diagnosis techniques," *Chemical Engineering Science*, vol. 50, no. 18, pp. 2861-2882, 1995

[Chiang et al., 2001] Chiang, L. H., Russell, E. L., Braatz. R. D. Fault detection and diagnosis in industrial systems. Springer, 2001

[Chow et Willsky 1984] Chow, E.Y., Willsky, A.S. Analytical redundancy and the design of robust failure detection system. In *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 29(7), pages: 603-614, 1984

[Chen, W. 2005] 'Unknown input observer of a class of switched control systems', Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005., pp. 1173–1178. doi: 10.1109/ACC.2005.1470120.

[Cheng 2011] H. Cheng, V.-M. Tikkala, A. Zakharov, T. Myller, and S.-L. JamsaJounela. Application of the enhanced dynamic causal digraph method on a three-layer board machine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19(3) :644 –655, 2011

[Clark R. N. 1975] 'Detecting Instrument Malfunctions in Control Systems', *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-11(4), pp. 465–473. doi: 10.1109/TAES.1975.308108.

[Constantinescu et al. 1995] Constantinescu, R.F, Lawrence, P.D., Hill, P.G., Brown, T.S. Model-based fault diagnosis of a two-stroke diesel engine, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1995

[Crombez 2011] D. Crombez, "Analyse de signaux vibratoires pour le diagnostic de défauts : Application sur les boîtes de vitesses automobiles," Université de Rouen, 2011

-D-

[Daly et al. 1979] Daly, K.C., Gai, E., Harrison, J.V. Generalized likelihood test for FDI in redundancy sensor configurations, *Journal of Guidance and Control* 2(1), 1979

[Dash et Venkatasubramanian 2000] Dash, S., Venkatasubramanian, V. Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems. *Proceedings of the conference on Process Systems Engineering Comput. & Chem*, 2000

[Davigny 2007] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » ; Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Décembre 2007

[Delmaire 1994] Delmaire G., Cassar J. P., Staroswiecki M., Comparison of identification and parity space approaches for failure detection in single-input single output, In: 33th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, pp. 2279-2285, 1994

[Dendouga 2010] A. Dendouga, « Contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (DFIM) » ; Thèse De Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, Février 2010.

[Derbel 2009] Haithem Derbel. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009.

[Dinca 1999] Dinca, L. Aldemir, T., and Rizzoni, G. A model-based probabilistic approach for fault detection and identification with application to the diagnosis of automotive engines, vol. 44(11), IEEE Transactions on Automatic Control, 1999.

[Djeriri 2015] DJERIRI, Youcef et MEROUFEL, Abdelkader. Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle. 2015. Thèse de doctorat. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, République Algérienne Démocratique et Populaire

[Doucet 2001] A. Doucet, N. J. Gordon, and V. Krishnamurthy, "Particle filters for state estimation of jump Markov linear systems," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 49, no. 3, pp. 613-624, 2001

[Dubois 2009] DUBOIS, Corinne. Le guide de l'éolien, techniques et pratiques. éditions Eyrolles, 2009.

[Ducard 2009] Ducard, G. J. J. Fault-tolerant Zight control and guidance systems: practical methods for small unmanned aerial. Advances in Industrial Control. Springer, 2009

-E-

[Energie 2016] Energie (2016) energie. Available at: Available at: <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11706>.

[EurObserv'ER 2018] EurObserv'ER, "État des Énergies renouvelables en Europe – EDITION 2018, 18e bilan, 2018" p. 109.

-F-

[Falcoz Alexandre, 2009] Falcoz, A. (2009). Contribution au développement de stratégies de diagnostic à base de modèles pour les véhicules spatiaux-Application à une mission de rentrée atmosphérique. Thèse de doctorat. UNIVERSITÉ BORDEAUX I

[Francois 2005] FRANCOIS, Bruno, ROBYNS, Benoit, DE JAEGER, Emmanuel, et al. Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension : L'Energie éolienne. REE. Revue de l'électricité et de l'électronique, 2005, no 5, p. 65-74.

[Frank 1996] Frank, P.M. Advances in observer-based fault diagnosis in dynamic systems. Engineering Simulation, 13:717-760, 1996 (a)

[Frank 1998] Frank, P.M. The application of fuzzy logic to fault diagnosis and supervision. LFA, pages:59-87, 1998

[Fussel et Isermann 1998] Fussel D., Isermann R. Model-based fault detection and diagnosis methods. Part A: methods, 4th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 4, USA, 1998

-G-

[Gaillard 2010] Gaillard, A. (2010). Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy

[Gentil 1997] Gentil S. Filtrage d'alarmes en temps réel. Rapport de Recherche convention DRET, 1997

[Gertler 1995] Gertler J., Diagnosing parameters faults: from parameter equation to parity relations, Proceedings of the American Control Conference, Seattle, USA, 1995.

[Ghennam 2011] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Septembre 2011.

[GLIGA 2017] GLIGA L.I., POPESCU D., CHAFOUK H., LUPU C., « Extended Kalman Filter for a Permanent Magnet Synchronous Generat », The 14th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD), Bucharest, Romania, November 16 - 17, 2017.

[Gouadec. D 2015] Gouadec, D. Energie Electrique Eolienne Production, prévision et intégration

au réseau, DUNOD. 2015

[Grenaille 2008] S. Grenaille, D. Henry and A. Zolghadri. A method for designing fault diagnosis filters for LPV polytopic systems. *Journal of Control Science and Engineering*, 2008

-H-

[Hacil 2012] HACIL, Mahieddine. Amélioration des performances des énergies éoliennes. 2012.

[Harir 2009] 'Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d ' Ecureuil par l ' Emploi de la Fonction d ' Enroulement Modifiée'. Mémoire du Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère ,2008.

[Hahn, Durstewitz and Rohrig, 2006] Hahn, B., Durstewitz, M. and Rohrig, K. (2007) *Wind Energy*, Wind Energy. Edited by J. Peinke, P. Schaumann, and S. Barth. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-33866-6.

[Henry2009] D. Henry, A. Falcoz and A. Zolghadri. Structured H1=HLPV filter for fault diagnosis. Some new results Proceedings of the IFAC Symposium SAFE PROCESS, 2009

-I-

[Ifpenergiesnouvelles 2019] Énergie Éolienne : Transformer le Vent en Électricité. Available at: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/> (Accessed: 10 April 2019).

[Idrissi, 2017] Idrissi, I., & Chafouk, H. (2017, December). A Bank of Kalman Filters for Current Sensors Faults Detection and Isolation of DFIG for Wind Turbine. In 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 1-6). IEEE.

[Isermann,1984] Isermann R., Process fault detection based on modeling and estimation methods: a survey, *Automatica*, vol. 20, no. 4, pp. 387-404, 1984.

[Isermann, 1991] Isermann R., Freyermuth B., Process fault diagnosis based on process model knowledge– Part I: Principles for fault diagnosis with parameter estimation, *Transaction of the ASME*, vol. 113, pp. 620-626, 1991

[Isermann et Balle 1997] Isermann. R., Balle, P. Trends in the Application of Model-Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes, *Control Engineering Practice*, 5(5), pages: 709-719, 1997

[Isermann et Phalle, 2000] Isermann, R., Phalle, P. Applied terminology of fault detection, supervision and safety for technical processes. IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Process, 2000.

[Isermann et al., 2002] Isermann, R., Schwarz, R., and Stolzl, S. Fault-tolerant drive-by-wire systems, IEEE Control Systems Magazine, 22(5), pp. 64-81, 2002.

[Isermann 2006] R. Isermann. An introduction from fault detection to fault tolerance. Springer, New York, NY, USA, 2006. 15

-J-

[Jiang 2002] Jiang, B., Wang, J. L., Soh, Y. C. An adaptive technique for robust diagnosis of faults with independent effect on system outputs, Internal Journal of Control 75: 792-802, 2002

[Julier 2004] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "Unscented filtering and nonlinear estimation," Proceedings of the IEEE, vol. 92, no. 3, pp. 401-422, 2004.

[Jolliffe 1986] Jolliffe, I.T. Principal components analysis. Springer-Verlag Press, 1986.

[J Talla 2015] J Talla, Z Peroutka, V Blahnik, et L Streit. Rotor and Stator Resistance Estimation of Induction Motor Based on Augmented EKF. International Conference on Applied Electronics. 8-9 September 2015.

[Julier 1997] 'New extension of the Kalman filter to nonlinear systems', p. 182. doi: 10.1117/12.280797.

[J. Martínez 2011] J. Martínez, PC. Kjaer and P. Rodriguez, "Parameterization of a synchronous generator to represent a doubly fed induction generator with chopper protection for fault studies," WIND ENERGY; 14:107–118, 2011.

[J. Morren 2007] J. Morren and S. W. de Haan, "Short-Circuit Current of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator," Power and Energy Society General Meeting IEEE, 2007.

-K-

[Kalman 1960] Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of basic Engineering, 82(1), 35-45.

[Kendouli 2011] KENDOULI, F., NABTI, K., ABED, K., et al. Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation. Revue des Energies Renouvelables, 2011, vol. 14, no 1, p. 109-120.

[Khanfara 2018] KHANFARA, M., EL BACHTIRI, R., BOUSSETTA, M., et al. Economic Sizing of a Grid-Connected Photovoltaic System: Case of GISER research project in Morocco. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018. p. 012006.

[Khov 2009] M. Khov, “Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : Détection des courts-circuits par suivi paramétrique,” Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009

[Khojet El Khil 2006] S. Khojet El Khil, « Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Décembre 2006.

[Krafczyk 2013] Pascal Krafczyk. Modélisation et mise en œuvre d'une chaîne de production éolienne à base de la MADA, Mémoire diplôme d'Ingénieur, Conservatoire National des Arts et Métiers Centre Régional Associé de Lorraine Centre d'enseignement de Nancy 2013

-L-

[Lee et al., 2015] Lee, J. K. et al. (2015) ‘Transformation algorithm of wind turbine blade moment signals for blade condition monitoring’, Renewable Energy. Elsevier Ltd, 79(1), pp. 209–218. doi: 10.1016/j.renene.2014.11.030.

[Leboeuf 2018] LEBOEUF, Nicolas. Contribution à l'étude des machines synchrones à aimants permanents en présence de défauts inter-spires : modélisation, détection de défauts inter-spires. 2012. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.

[Ling, 2010] P. Ling, ‘Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension,’ Thèse de Doctorat, École Centrale de Lille, 2010.

[L. Li 2016] L. Li, Z. Wang, et Y. Shen, « Fault diagnosis for attitude sensors via a bank of extended Kalman filters », in 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu, China, 2016, p. 6634-6638.

[LOPEZ Miguel 2010] LOPEZ Miguel , "Contribution à l'Optimisation d'un Système De Conversion Éolien pour une Unité de Production Isolée", Thèse de doctorat, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des. Université PARIS-SUD 11. 2010

-M-

[Makanipower 2019] makanipower (2019) No Title. Available at: <https://makanipower.com/>.

[**MANWELL J. 2010**] MANWELL J. Wind energy explained: theory, design and application. John Wiley & Sons. 2010

[**Methnani 2013**] Methnani Salowa, "Diagnostic, reconstruction et identification des des défauts capteurs et actionneurs : application aux station d'épurations des eaux usées". Thèse de doctorat, Université de Toulon. 2012

[**Merlin 1974**] Merlin, P. M. 1974, A study of the recoverability of computing systems, thèse de doctorat, Department of Information and Computer Science, University of California.

[**Montmain 2000**] J. Montmain and S. Gentil. Dynamic causal model diagnostic reasoning for online technical process supervision. *Automatica*, 36(8) :1137–1152, 2000.

[**Morren 2007**] J. Morren and S. W. de Haan, "Short-Circuit Current of Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generator," *Power and Energy Society General Meeting IEEE*, 2007.

[**Muljadi 2002**] Muljadi, E. and Butterfield, C. P. (2002) 'Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(1), pp. 240–246. doi: 10.1109/28.903156.

[**Müller 2002**] Müller, S., Deicke, M. and De Doncker, R. W. (2002) 'Doubly fed induction generator systems for wind turbines', *IEEE Industry Applications Magazine*, 8(3), pp. 26–33. doi: 10.1109/2943.999610.

[**Mutschler and Hoffmann 2003**] Mutschler, P. and Hoffmann, R. (2003) 'Comparison of wind turbines regarding their energy generation', pp. 6–11. doi: 10.1109/psec.2002.1023839.

[**Mirecki 2005**] A. MIRECKI, Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse N°2213 (2005), Institut national polytechnique de Toulouse, France.

[**Multon 2004**] B. Multon ; X. Roboam ; B Dakyo ; C. Nichita ; O Gergaud ; H. Ben Ahmed, "Aérogénérateurs électriques", *Techniques de l'Ingénieur, Traités de génie électrique*, D3960, Novembre 2004.

[**M Abdelrahem 2015**] M Abdelrahem, C Hackl, et R Kennel. Application of extended Kalman filter to parameter estimation of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems. in *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Taormina. Italy, 2015: 226-233.

[Mironovski 1980] Mironovski, L.A. Functional diagnosis of dynamic system - a survey, Automation Remote Control 41, pages: 1122-1143, 1980

-N-

[Nesmat 2008] Nesmat Abu-Tabak. Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation. Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Lyon, 2008

-O-

[Ouyessaad 2014] Ouyessaad Hakim," Diagnostic d'une génératrice asynchrone à double alimentations : Application à l' énergie éolienne". Thèse de doctorat, Université de Rouen. 2014

[Ondel 2006] Ondel, O. (2006) 'Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone', pp. 1–289.

[Orchard 2006] M. E. Orchard, "A Particle filtering-based framework for on-line fault diagnosis and failure prognosis." PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2006.

-P-

[Patan 2008] Patan. K. Artificial Neural Networks for the Modeling and Fault Diagnosis of Technical Processes. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer, 2008.

[Poitiers 2003] Poitiers Frédéric, "ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". Thèse de doctorat. Université de Nantes, 2003

-Q-

[Q. Lu 2011] Q. Lu, T. Breikin, et H. Wang, « Modelling and fault diagnosis of stator inter-turn short circuit in doubly fed induction generators », Proc. IFAC Milan Italy, 2011.

-R-

[Ranganathan 2002] Ranganathan, V. T. 2002. "Variable-Speed Wind Power Generation Using a Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine: A Comparison with Alternativ Schemes." IEEE Power Engineering Review 22(7): 52.

[Razafindrazato 2010] G. M. R. Razafindrazato, "Méthodes numériques pour la caractérisation vibratoire de structures complexes," Université Paris Est Créteil, 2010.

[Renac 2018] Rapport « ReGrid : Notions élémentaires sur l'énergie éolienne », Renewables Academy (RENAC) AG, Schönhauser Allee 10-11, 10119 Berlin (Germany)

[Riouch 2012] RIOUCH, T. et EL-BACHTIRI, R. New control strategy to reduce the fluctuations of the dc bus of a wind turbine using the DFIG. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2012, vol. 40, no 2.

[Riouch 2013] RIOUCH, T. et BACHTIRI, R. E. Robust control of the active and reactive power exchanged with the rotor of the DFIG and the grid. WSEAS Trans. on Environment and Development, 2013, vol. 9, no 1, p. 35-45.

[Robyns 2010] B. Robyns, B. François, Ph. Degobert et J-P. Hautier, « Commande vectoriel de la Machine asynchrone »; Edition Technip, Paris, 2007.

-S-

[Salloum 2007] G. Salloum, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Mars 2007.

[Sename Gipsa-Lab 2016] O. Sename Gipsa-Lab and O. Sename, "Robust and LPV control of MIMO systems Part 1: Tools for analysis and control of dynamical systems," no. July, pp. 1–48, 2016.

[Shahriari 2016] SHAHRIARI, Sayyed Ali Akbar, RAOOFAT, Mahdi, DEHGHANI, Maryam, et al. Dynamic state estimation of a permanent magnet synchronous generator-based wind turbine. IET Renewable Power Generation, 2016, vol. 10, no 9, p. 1278-1286.

[Shereen 2016] M. K. Shereen, M. I. Khan, N. Khan, and W. Ullah, "By the Design and Implementation of Modified Kalman Filter for LPV Systems," Int. J. Eng. Work., vol. 3, no. 4, pp. 26–31, 2016.

[Simon 2006] Simon, D. (2006) Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ , and Nonlinear Approaches, Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ , and Nonlinear Approaches. doi: 10.1002/0470045345.

[Sylla 2013] Sylla, Abdoulaye Mamadie. Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation. 2013. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.

[Szaszi 2005] I. Szaszi, A. Marcos, G. J. Balas and J. Bokor. Linear Parameter Varying detection filter design for a Boeing 747-100/200 aircraft. Journal of Guidance Control and Dynamics, 28(3)(8):461 470, 2005.

-T-

[Teninge Alexandre 2010] Teninge Alexandre, "PARTICIPATION AUX SERVICES SYSTÈME DE PARCS ÉOLIENS MIXTES : APPLICATION EN MILIEU INSULAIRE", Institut National Polytechnique de Grenoble. Thèse de doctorat, 2010. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00473142> .

[Tafticht 2006] Tahar Tafticht, Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien, Thèse (2006), Université du Québec à Trois-Rivières, Canada.

[Tameghe 2012] Tameghe, Theubou et ANDY, Tommy. Modélisation et simulation d'un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale. 2012. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

[Tamaarat 2015] AZZOUZ, Tamaarat. Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. 2015. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.

[Toufouti 2008] Toufouti Riad, Contribution de la commande directe du couple de la machine asynchrone, Thèse, (2008), Université Mentouri de Constantine, Algérie

[Thorsen and Dalva, 1995] Thorsen, O. V. and Dalva, M. (1995) 'A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries', IEEE Transactions on Industry Applications, 31(5), pp. 1186–1196. doi: 10.1109/28.464536.

[Thorsen and Dalva, 1999] Thorsen, O. V. and Dalva, M. (1999) 'Failure identification and analysis for high-voltage induction motors in the petrochemical industry', IEEE Transactions on Industry Applications, 35(4), pp. 810–818. doi: 10.1109/28.777188.

[Trigeassou 2013] Trigeassou, J. C. (2013) Electrical Machines Diagnosis, Electrical Machines Diagnosis. doi: 10.1002/9781118601662.

-V-

[Vaseghi 2010] B. Vaseghi, "Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre spires : modélisation - Réduction du courant de défaut," Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010

[Vestas 2019]: Available at: <https://www.vestas.com/>

[Vidal 2004] P. E. Vidal, « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2004.

[Venkatasubramanian et al., 2003] Venkatasubramanian, V. et al. (2003) 'A review of process fault detection and diagnosis part III: Process history based methods', Computers and Chemical Engineering, 27(3), pp. 327–346. doi: 10.1016/S0098-1354(02)00162-X.

[Vladislav Akhmatov 2007] AKHMATOV, Vladislav. Induction generators for wind power. Multi-Science Publishing, 2007.

[VELLEMANS P. 2006] VELLEMANS P., BILLAUDEL P. and RIERA B., «Traceability, a new approach to obtain decision-making aid», European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, EAM'06, Valenciennes, France, 2006

-Y-

[Yu et al. 2004] G. I. Yu, et al., «A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms», in Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE, 2002, pp. 1531-1534.

-Z-

[Zhou 2019] D. Zhou, Y. Zhao, Z. Wang, X. He, and M. Gao, "Review on Diagnosis Techniques for Intermittent Faults in Dynamic Systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. PP, no. c, pp. 1–1, 2019.

[Zwingelstein, 1995] Zwingelstein, G. Diagnostic des défaillances -Théorie et pratique pour les systèmes industriels. Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, Paris, 1995

-W-

[Willisky, 1976] Willisky, A.S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. Automatica, vol. 12, pages : 601-61, 1976.

Résumé - Actuellement, les machines Asynchrones à Double Alimentation (MADA) sont omniprésentes dans le secteur éolien, grâce à leur simplicité de construction, leur faible coût d'achat et leur robustesse mécanique ainsi que le nombre faible d'interventions pour la maintenance. Cependant, comme toute autre machine électrique, ces génératrices sont sujettes aux défauts de différent ordre (électrique, mécanique, électromagnétique...) ou de différents types (capteur, actionneur ou composants du système). C'est pourquoi, il est primordial de concevoir une approche de diagnostic permettant de manière anticipée, de détecter, localiser et identifier tout défaut ou anomalie pouvant altérer le fonctionnement sain de ce type de machine. Motivés par les points forts des méthodes de diagnostic de défauts à base d'observateurs, nous proposons d'une part, dans cette thèse, une approche de détection, localisation et identification des défauts de la MADA d'une éolienne à vitesse variable, à base des observateurs de Kalman, performants et largement utilisés. Les erreurs d'estimation d'état du filtre de Kalman du type LPV et de ses variantes non-linéaires, à noter : le Filtre de Kalman Étendu (EKF) et le Filtre de Kalman sans-Parfum (UKF), sont utilisés comme résidus sensibles aux défauts. En vue d'éviter les fausses alarmes et de découpler les défauts des perturbations et des bruits, l'analyse des résidus générés est réalisée par des tests statistiques tels que : Test de Page Hinkley (PH). Pour la localisation des défauts multiples et simultanés, la Structure d'Observateurs Dédiés (DOS) et la Structure d'Observateurs Généralisés (GOS) sont appliquées. De plus, l'amplitude du défaut est déterminée dans l'étape d'identification de défaut. Les défauts capteurs, actionneurs et composants de la MADA, sont traités dans ce travail de recherche.

Mots clés : Diagnostic de défauts, Machine Asynchrone à Double Alimentation, Défaut Capteur, Défaut Actionneur, Défaut Composant, Court-Circuit Inter-Spires, Test de Page-Hinkley (PH), Schéma d'Observateur Dédié (DOS), Filtre de Kalman, Filtre de Kalman Étendu (EKF), Filtre de Kalman sans-parfum (UKF)

Abstract - Actually, the Doubly Fed Induction Generators (DFIG) are omnipresent in the wind power market, owing to their construction simplicity, their low purchase cost and their mechanical robustness. However, as any other electrical machine, these generators are subject to defects of different order (electrical, mechanical, electromagnetic ...) or of different type (sensor, actuator or system). That's why, it is important to design an effective diagnostic approach, able to early detect, locate and identify any defect or abnormal behavior, which could undermine the healthy operation of this machine. On the one hand, motivated by the observer-based fault diagnosis methods strengths, we proposed, in this thesis, a diagnostic approach for the faults detection, localization and identification of the DFIG used in variable speed wind turbine. This approach is based on the use of the efficient and widely used Kalman observers. The state estimation errors of the Kalman filter for LPV system and the non-linear Kalman filters, named: The Extended Kalman Filter (EKF) and the Unscented Kalman Filter (UKF) are used as faults sensitive residuals. In order to avoid false alarms and to decouple faults from disturbances and noises, the faults detection is carried out by the analysis of the residuals generated, by the mean of statistical tests such as: Hinkley Page Test (PH). For the localization step in case of multiple and simultaneous faults, the Dedicated Observer scheme (DOS) and the Generalized Observer scheme (GOS) are applied. In addition, the fault level is determined in the fault identification step. Sensor faults, actuator and system faults of DFIG, are treated in this research work.

Keywords: Fault Diagnosis, Doubly Fed Induction Generator, Sensor Fault, Actuator Fault, System Fault, Inter-Turn Short-Circuit Fault, Page-Hinkley (PH) test, Dedicated Observers Scheme (DOS), Kalman Filter, Extended Kalman Filter (EKF), Unscented Kalman Filter (UKF).