

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département d'Automatisation et Electrification

Mémoire de Master en Commande Automatique

Présenté par :

ALLOUCHE Idir

Le Titre

**Commande et Diagnostic des Défauts d'un
Système Eolien à Base de la MADA**

Encadré par :

Dr BEDDEK Karim

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Leur soutien, leur expertise et leurs encouragements ont été d'une importance capitale pour mener à bien ce projet.

*Je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon encadreur de ce mémoire, **Dr BEDDEK Karim**, pour son précieux encadrement, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce parcours. Sa rigueur scientifique et son engagement ont été une source d'inspiration et m'ont permis d'approfondir ma réflexion et d'atteindre un niveau de qualité supérieur.*

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers mes professeurs de mon université pour leur dévouement au travail et leurs efforts précieux pour enrichir nos connaissances.

Je souhaite remercier chaleureusement mes proches et ma famille pour leur soutien indéfectible tout au long de mes études. Leur amour, leurs encouragements et leur compréhension ont été mes plus grandes forces dans les moments de doute et de difficulté.

Je suis également reconnaissant envers mes amis qui ont été présents à mes côtés, qui m'ont soutenu et avec qui j'ai partagé de précieux moments de détente et de divertissement. Leur présence a été essentielle pour équilibrer ma vie entre mes études et ma vie personnelle.

Dédications

Ce travail est fondamentalement dédié à ma mère qui a beaucoup donnée pour faire de moi la personne que je suis.

Je tiens à dédier ce travail à mon père aussi qui n'a jamais hésité un instant à tout me fournir pour que j'atteigne ce grade.

Mes deux sœurs et mon frère qui ont avaient un rôle important dans mon éducation et qui étaient mes parents secondaires, Cette thèse est dédiée à vous !

Finalement je dédie mon travail à mes amis Mohamed, Zakaria, Ayoub et Fayçal pour leur soutien moral et leur encouragement constant.

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédications.....	II
Table des matières.....	III
Table des figures.....	VI
Liste des abréviations.....	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Généralités sur les Énergies Renouvelables

1 Introduction	4
2 Pourquoi l'énergie renouvelable ?	5
3 Sources de l'énergie renouvelable	6
3.1 L'énergie solaire	6
3.1.1 Système photovoltaïque solaire	6
3.1.2 Énergie solaire thermique	7
3.1.3 Défis concernant l'énergie solaire	8
3.2 L'énergie biomasse	8
3.2.1 Avantages environnementaux de la biomasse	10
3.3 L'énergie hydraulique	11
3.3.1 Principe de l'énergie hydraulique	11
3.4 L'énergie géothermique	13
3.4.1 Méthode d'exploitation de la géothermie	14
3.5 L'énergie éolienne :	15
3.5.1 Les éoliennes terrestres/offshores	15
4 Avantages et inconvénients	17
5 Conclusion	19

Chapitre 2 : Eolienne basée sur une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

1 Introduction	21
2 Architecture d'une éolienne avec MADA	22
2.1 Le rotor principal	23
2.2 Le multiplicateur	24
2.3 La MADA	25
2.3.1 Caractéristiques d'une machine asynchrone à double alimentation	26

2.4	Les convertisseurs CCR et CCM	27
2.5	Les bagues collectrices	29
2.6	Le système du contrôle	30
3	Modélisation de l'éolienne	31
3.1	La turbine d'éolienne	31
3.2	Modélisation du MADA	32
4	Commande d'une éolienne avec MADA	33
4.1	Stratégie de commande MPPT	33
4.2	Commande coté machine d'une MADA	34
4.3	Commande coté réseau de la MADA	36
5	Conclusion	38

Chapitre 3 : Modélisation MATLAB/Simulink d'une Eolienne basée sur la MADA

1	Introduction	41
2	Modélisation des composants de système	42
2.1	La génératrice	44
2.2	Les convertisseurs et le DC-link	45
2.3	Les capteurs tension courant	45
3	Modélisation des dispositifs de commande	46
3.1	Le convertisseur PWM	46
3.2	Modélisation Simulink de la commande coté machine	47
3.3	Modélisation de la commande coté réseau	48
4	Simulation de modèle	49
4.1	La commande des courant Id/Iq	49
4.1.1	Comportement de système avec vitesse de rotation fixée	50
4.1.2	Réponse de système avec vitesse de rotation variable	51
4.1.3	Commande vectorielle des courants id/iq avec une consigne variable	53
4.2	Régulation de tension Vdc de DC-link	55
5	Conclusion	56

Chapitre 4 : Défaut des Capteurs et leurs Effets sur le Fonctionnement de Système

1	Introduction	58
2	Présentation des défauts	59
2.1	Les défauts additifs	59
2.2	Les défauts multiplicatifs	59
3	Modélisation des défauts dans MATLAB/Simulink	60
4	Simulation et effets des défauts	61

4.1	Les défauts de boucle de régulation DC-link	61
4.2	Défauts de commande vectorielle	64
5	Conclusion	69
Chapitre 5 : Méthode de Redondance pour Diagnostic des Défaut des Capteurs		
1	Introduction	72
2	Redondance des capteurs	73
3	Modélisation Matlab/Simulink de la méthode	73
4	Simulation et résultats	78
5	Conclusion	83
Conclusion générale		84
Référence		86

Table des figures

Figure 1. Principe de fonctionnement de l'énergie solaire PV[6]	7
Figure 2. Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique[6]	8
Figure 3 Ressources génératrices de biomasse[8]	9
Figure 4. Les avantages de la biomasse[9]	10
Figure 5. Production d'électricité à l'aide d'une centrale hydroélectrique à réservoir[11]	11
Figure 6. Production d'électricité à l'aide d'une centrale hydroélectrique au fil d'eau[12]	12
Figure 7. Production d'électricité à l'aide d'une centrale hydroélectrique marémotrice[12]	12
Figure 8. Production d'électricité à l'aide d'une centrale hydroélectrique pompage- turbine[12]	13
Figure 9. Parc éolien terrestre	16
Figure 10. Parc d'éoliennes offshores	16
Figure 11. Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA[13]	22
Figure 12. Les éléments principaux d'une éolienne[14]	23
Figure 13. Constitution d'une éolienne[15]	24
Figure 14. Structure interne d'un multiplicateur d'une éolienne[17]	25
Figure 15. Machine asynchrone doublement alimentée (ABB)[18]	26
Figure 16. Représentation CAD de la MADA[19]	27
Figure 17. Convertisseurs CCR et CCM dans un système basé sur une MADA	27
Figure 18. Convertisseur d'une MADA fabriqué par ingetteam [20]	28
Figure 19. Bagues collectrices ABB[21]	29
Figure 20. Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau[13]	31
Figure 21. Plages d'exploitation d'une turbine éolienne (axe horizontal) en fonction de la vitesse du vent [25]	34
Figure 22. Commande coté machine	36
Figure 23. Commande coté réseau	37
Figure 24. Vue d'ensemble du modèle éolienne basée sur MADA dans Simulink	43
Figure 25. Modèle Simulink d'une génératrice MADA et ses paramètres	44
Figure 26. Modèle Simulink du DC-link et les CCM/CCR	45
Figure 27. Types de capteurs utilisés dans la modélisation	46
Figure 28. Les modèles de PWM dans Simulink	47
Figure 29 Modèle Simulink de commande coté machine	47
Figure 30. Conversion et commande coté machine	48
Figure 31. Le modèle Simulink de contrôleur coté réseau	49
Figure 32 Choix de références dans la commande coté machine	50
Figure 33. Vitesse de rotation de rotor	50
Figure 34. Commande vectorielle des courants avec vitesse de rotation fixe	51
Figure 35. Énergie rotorique avec vitesse de rotation fixée	51
Figure 36. Vitesse de rotation variable du rotor	52
Figure 37. Régulation Id/Iq avec vitesse variable	52
Figure 38. L'énergie rotorique avec une vitesse variable	53
Figure 39. Consigne Ird-ref variable	53
Figure 40. L'énergie rotorique en variant l'Ird	54

Figure 41. Consigne I_{rq} -ref variable	54
Figure 42. L'énergie rotorique en variant l' I_{rq}	54
Figure 43. Régulation V_{dc} avec référence fixée	55
Figure 44. Régulation V_{dc} avec référence variable	55
Figure 45. Positionnement des blocs de défauts sur le système	60
Figure 46. Blocs Simulink des défauts	60
Figure 47. Les défauts des capteurs dans une boucle de régulation	61
Figure 48. Régulation DC-link avec absence de défauts	61
Figure 49. Défaut additif de pourcentage -2%	62
Figure 50. Défaut additif de pourcentage +2%	62
Figure 51. Défaut additif de -5%	62
Figure 52. Défaut additif de +5%	63
Figure 53. Défaut multiplicatif du gain 0.9	63
Figure 54. Défaut multiplicatif du gain 0.95	63
Figure 55. Défaut multiplicatif du gain 1.05	64
Figure 56. Défaut multiplicatif du gain 1.1	64
Figure 57. Conversion de mesure réelle I_{r_abc}	65
Figure 58. Courant I_{r_abc} sans défaut	65
Figure 59. Courant I_{r_abc} sans défaut - zoom	65
Figure 60. Commande i_d/i_q sans défaut	66
Figure 61. (a) Mesure de capteur courant I_{r_abc} avec défaut multiplicatif de gain 0.7 (Phase A) (b) Zoom de signal	66
Figure 62. Les courants I_d/I_q avec un défaut multiplicatif de gain 0.7 (Phase A)	67
Figure 63. (a) Mesure de capteur courant I_{r_abc} avec défaut multiplicatif de gain 0.7 (Phases A,B) (b) Zoom de signal	67
Figure 64. Les courants I_d/I_q avec un défaut multiplicatif de gain 0.7 (Phases A,B)	68
Figure 65. (a) Mesure de capteur courant I_{r_abc} avec défaut multiplicatif de gain 1.3 (Phase C) (b) Zoom de signal	68
Figure 66. Les courants I_d/I_q avec un défaut multiplicatif de gain 1.3 (Phases C)	69
Figure 67. Schéma d'un approche de FDI à base redondance des capteurs	73
Figure 68. Modèle FDI à base de redondance des capteurs pour un capteur courant triphasé	74
Figure 69. Modèle FDI à base de redondance des capteurs pour un capteur de tension DC-link	74
Figure 70. Soustraction des mesures	74
Figure 71. L'algorithme FDI à base de redondance des capteurs	76
Figure 72 Mise en place des blocs de retard unitaire	77
Figure 73. Détection retardé de défauts des capteurs	77
Figure 74. Effet de défaut additif de +5%	78
Figure 75. (a) Mesure de V_{dc} de système en appliquant la FDI (b) Sortie de capteur défectueux	78
Figure 76. L'effet de défaut sur la mesure donnée par le capteur de courant rotorique	79
Figure 77. Courant rotorique triphasé dans le cas d'injection d'un défaut	79
Figure 78. Effet d'un défaut additif sur la commande vectorielle	79
Figure 79. Etat de capteur courant à l'occurrence de défaut	80
Figure 80. (a) Résultat de mesure sélectionnée par le modèle FDI (b) Résultat de mesure de capteur défectueux	80
Figure 81. Commande des courants I_d/I_q durant un défaut	81

Figure 82. Etat logique d'un capteur de courant rotorique	81
Figure 83. (a) Résultat de mesure sélectionnée par le modèle FDI (b) Résultat de mesure de capteur défectueux.....	82
Figure 84. Commande vectorielle avec système FDI	82

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque

CSP : Concentrated Solar Power

MADA : Machine Asynchrone Doublement Alimentée

CCM : Convertisseur Coté Machine

CCR : Convertisseur Coté Réseau

AC : Courant Alternatif

DC : Courant Continu

MPPT : Maximum Power Point Tracking

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

PWM : Pulse Width Modulation

FDI : Fault Detection and Isolation

Introduction générale :

En raison des conséquences environnementales considérables provoquées par les combustibles fossiles, l'attention du public et de la communauté scientifique se concentre de plus en plus sur les énergies renouvelables[1]. Les sources de cette énergie sont des ressources renouvelables ou rechargées naturellement sur des périodes généralement courtes. Les cinq principales ressources d'énergie renouvelable sont l'eau, le vent, la géothermie, la biomasse, Ces ressources et leurs méthodes d'exploitation en monde entier se diffèrent prenant en compte les facteurs géographiques et économiques.

Grace à la diminution des couts de la conception et l'installation dans les années récentes, l'utilisation des énergies renouvelables se répand rapidement depuis le début du XXIe siècle, et actuellement un peu plus de 20% de l'électricité mondiale est produite à partir de sources renouvelables[1]. Cependant, il devient de plus en plus important d'abandonner toutes ces sources d'énergie fossile qui causent de graves dommages à l'environnement et à la santé publique.

L'énergie éolienne en ces années dernières partage une somme remarquable sur le pourcentage de production d'électricité par les sources vertes dans l'échelle mondiale étant une source d'énergie durable et de sa compétitive économiquement, offrant une production d'énergie propre sans émissions de gaz à effet de serre et à des prix de plus en plus compétitifs. L'utilisation des éoliennes basées sur des génératrices asynchrones doublement alimentés est une méthode efficace pour l'attraction de maximum puissance possible malgré les conditions de vents instables, c'est grâce à une architecture et techniques de commandes qui garantissent cette opération, lorsque le vent fait tourner les pales de l'éolienne, le rotor génère de l'énergie mécanique. Le rotor est connecté à un générateur asynchrone triphasé, qui convertit cette énergie mécanique en énergie électrique à fréquence variable. Le courant électrique est ensuite acheminé vers le convertisseur côté rotor, qui ajuste la tension et le courant pour optimiser la production d'énergie. Le convertisseur côté réseau régule la tension et la fréquence du courant électrique avant de le fournir au réseau électrique. Un système de contrôle surveille et ajuste en temps réel les paramètres du convertisseur et de l'éolienne pour maximiser l'efficacité de conversion et garantir la stabilité du système. Ainsi, l'éolienne DFIG permet un fonctionnement à vitesse variable, un contrôle précis de la production d'énergie et une intégration stable avec le réseau électrique.

La simulation des systèmes réels présente plusieurs avantages. Elle permet une compréhension approfondie du fonctionnement des systèmes, facilite la conception et l'optimisation en évaluant différentes configurations et stratégies, permet l'évaluation des performances dans des conditions réalistes, détecte les erreurs et problèmes potentiels, réduit les risques et les coûts associés à la mise en œuvre réelle, et facilite la formation et l'apprentissage sans risques. En résumé, la simulation des systèmes réels offre une meilleure compréhension, une conception optimisée, une évaluation précise, une détection précoce des problèmes, une réduction des risques et des coûts, ainsi que des opportunités de formation sécurisées. Le programme MATLAB/Simulink est l'un des outils qui peut nous permettre de modéliser et simuler le système d'une éolienne à machine asynchrone doublement alimentée (MADA). A travers cette simulation on peut arriver à examiner des scénarios possibles qui peut survenir tels que les défauts et les anomalies de système.

Les défauts des capteurs conduisent à des comportements indésirables de la part de système éolien à base MADA, notamment les boucles de régulation qui utilisent les données de ces capteurs comme des références réelles à réguler, donc un capteur qui donne un résultat inexact va perturber la commande et donc le système.

Les défauts qui peuvent arriver aux capteurs sont généralisés à des défauts additifs qui rajoute un facteur à la valeur réelle mesurée et multiplicatifs qui multiplie les mesures par un constant différent de 1.

La présence des problèmes discutés précédemment nécessite l'existence des approches efficaces qui vont éliminer ces anomalies, C'est pour cela les méthodes de détection et isolation des défauts (FDI) sont utilisées pour détecter, diagnostiquer et localiser les défauts dans les systèmes, elles consistent à surveiller en continu les signaux ou les paramètres du système afin d'identifier toute déviation ou anomalie par rapport au comportement attendu. Cela peut être réalisé en comparant les mesures réelles avec des seuils prédéfinis en utilisant des modèles mathématiques ou en appliquant des techniques de traitement du signal.

La méthode de redondance des capteurs consiste à utiliser plusieurs capteurs pour mesurer la même grandeur physique afin d'améliorer la fiabilité et la précision des mesures. Les capteurs redondants sont placés en parallèle et leurs mesures sont comparées pour détecter les éventuelles déviations ou erreurs. Si un capteur présente un comportement anormal, les autres capteurs peuvent fournir des mesures fiables qui permettent de détecter et d'isoler le capteur défectueux. Cette méthode permet de réduire les risques de défaillance des capteurs et d'améliorer la robustesse et la sécurité des systèmes.

Chapitre 1

Généralités sur les Énergies Renouvelables

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

1 Introduction :

Le terme "énergie" trouve son origine dans le mot grec "energeia" et les mots français "en" et "ergon", qui signifient respectivement "dans" et "travail". On peut définir l'énergie comme "la propriété quantitative de tout objet capable de fournir une force pour accomplir un travail" ou "la propriété quantitative capable de chauffer un objet". Selon le principe de conservation de l'énergie, celle-ci est généralement conservée dans un système, car elle ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre. L'énergie est communément définie en termes de "capacité d'un objet à effectuer un travail", et ses unités internationales (SI) sont donc identiques à celles du "travail". L'unité de mesure du travail et de l'énergie est le "joule" (J), qui a été nommé en l'honneur de James Prescott Joule, un scientifique et ingénieur qui a réalisé des expériences sur "l'équivalent mécanique de la chaleur"[1].

Les termes "ressources d'énergie propre", "énergie renouvelable" et "technologies d'énergie verte" sont largement utilisés de nos jours et suscitent une grande attention. Outre l'énergie éolienne et l'énergie solaire, d'autres sources d'énergie émergent rapidement en tant que ressources énergétiques fondamentales pour l'avenir. L'énergie renouvelable peut être définie comme "toute forme d'énergie utile qui peut être rapidement régénérée après utilisation". De manière plus spécifique, voici quelques-unes des ressources d'énergie renouvelable les plus populaires[1] :

- Le soleil est une source directe ou indirecte d'énergie solaire. Les radiations solaires chauffent de manière non uniforme la surface de la Terre, ce qui génère l'énergie solaire.
- La biomasse est également une source significative d'énergie renouvelable. Elle se compose de matière organique provenant d'animaux et de plantes. La biomasse peut être utilisée pour produire des produits chimiques, des carburants pour les transports ou de l'électricité, et elle est communément appelée "énergie biomasse".
- L'énergie géothermique est une forme d'énergie renouvelable obtenue à partir de la chaleur naturelle emmagasinée dans la Terre. Elle provient de la chaleur interne de la planète, résultant de processus géologiques tels que la radioactivité et la formation de la Terre. Cette énergie est exploitée en utilisant des puits géothermiques pour extraire la chaleur du sous-sol, qui peut être utilisée pour le chauffage, la production d'électricité et d'autres applications énergétiques. L'énergie géothermique offre une source durable et propre d'énergie, avec des avantages environnementaux significatifs.
- L'énergie hydraulique, également appelée énergie hydroélectrique, est une forme d'énergie renouvelable produite à partir du mouvement de l'eau. Elle est générée par l'utilisation de la force de l'eau en mouvement, telle que les rivières, les chutes d'eau ou les marées, pour faire tourner des turbines et produire de l'électricité.

L'énergie hydraulique est une source d'énergie propre et durable, largement utilisée dans les centrales hydroélectriques pour alimenter les réseaux électriques. Elle offre un potentiel considérable en termes de production d'électricité renouvelable, avec des avantages écologiques et économiques importants.

- L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable obtenue à partir de l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement. Elle est exploitée par des éoliennes, qui convertissent l'énergie du vent en électricité. L'énergie éolienne est une source d'énergie propre et durable qui contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la dépendance aux combustibles fossiles. C'est un secteur en croissance rapide dans le domaine des énergies renouvelables, offrant un potentiel important pour la production d'électricité à grande échelle. L'exploitation de la puissance du vent présente des avantages environnementaux et contribue à un avenir plus durable et plus respectueux de l'environnement.

2 Pourquoi l'énergie renouvelable ?

La production d'électricité est la principale cause de pollution de l'air industrielle aux États-Unis. La majeure partie de notre électricité provient du charbon, du nucléaire et d'autres centrales électriques non renouvelables. La production d'énergie à partir de ces ressources a un impact considérable sur notre environnement, polluant notre air, notre sol et notre eau[2].

La production totale d'électricité est responsable de 42,5 % des émissions mondiales de CO₂. 73 % de ces émissions proviennent des centrales à charbon[3].

Ainsi, par kilowatt-heure (kWh) produit, une centrale à charbon émet 950 g de CO₂, contre 350 g pour une centrale au gaz³. Pour les énergies renouvelables telles que l'hydraulique, l'éolien et le solaire photovoltaïque ou thermique, les seules émissions de CO₂ sont celles liées à la construction des installations. Ainsi un kWh de solaire photovoltaïque émet entre 60 et 150 g de CO₂ selon le lieu de fabrication des panneaux photovoltaïques, un kWh éolien 3 à 22 g et 1 kWh hydraulique 4 g. Quant au nucléaire, même en tenant compte du futur démantèlement des centrales vieillissantes, 1 kWh ne représente que 6 g de CO₂... qui sont à comparer aux 950 g des centrales à charbon ! [3]

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être utilisées pour produire de l'électricité avec moins d'impact sur l'environnement. Il est possible de produire de l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable sans émettre de CO₂, la principale cause du changement climatique mondial[2]. Les combustibles fossiles - charbon, pétrole et gaz - sont quant à eux des ressources non renouvelables qui mettent des centaines de millions d'années à se former. Lorsqu'ils sont brûlés pour produire de l'énergie, les combustibles fossiles émettent des gaz à effet de serre nocifs, tels que le dioxyde de carbone.

La production d'énergie renouvelable génère beaucoup moins d'émissions que la combustion des combustibles fossiles. La transition des combustibles fossiles, qui représentent actuellement la part la plus importante des émissions, vers l'énergie renouvelable est essentielle pour faire face à la crise climatique[4].

Les énergies renouvelables sont maintenant moins chères dans la plupart des pays et génèrent trois fois plus d'emplois que les combustibles fossiles[4].

	Coût total d'installation			Facteur de capacité			Coût moyen actualisé de l'électricité		
	(2021 USD/kW)			(%)			(2021 USD/kWh)		
	2010	2021	Pourcentage de changement	2010	2021	Pourcentage de changement	2010	2021	Pourcentage de changement
Bio-énergie	2 714	2 353	-13%	72	68	-6%	0.078	0.067	-14%
Energie géothermique	2 714	3 991	47%	87	77	-11%	0.050	0.068	34%
Energie hydraulique	1 315	2 135	62%	44	45	2%	0.039	0.048	24%
Energie solaire PV	4 808	857	-82%	14	17	25%	0.417	0.048	-88%
Energie solaire TC	9 422	9 091	-4%	30	80	167%	0.358	0.114	-68%
Eolienne onshore	2 042	1 325	-35%	27	39	44%	0.102	0.033	-68%
Eolienne offshore	4 876	2 858	-41%	38	39	3%	0.188	0.075	-60%

Tableau 1. Tendances mondiales moyennes pondérées du coût total d'installation, du facteur de capacité et du coût actualisé de l'électricité par technologie, en 2010 et 2021[5].

3 Sources de l'énergie renouvelable :

Les sources d'énergie renouvelable sont des ressources naturelles qui peuvent être exploitées de manière durable pour la production d'énergie. Elles comprennent l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, la biomasse et les énergies marines. Ces sources d'énergie offrent des avantages considérables par rapport aux combustibles fossiles, car elles sont abondantes, inépuisables et ne produisent pas d'émissions nocives. De plus, les énergies renouvelables contribuent à réduire notre dépendance aux sources d'énergie non renouvelables, à promouvoir la sécurité énergétique et à atténuer les effets du changement climatique.

3.1 L'énergie solaire :

L'énergie solaire fait référence à l'énergie radiante émise par le Soleil, qui peut être captée et convertie en formes d'énergie utilisables. C'est une source d'énergie renouvelable et propre qui a gagné en popularité ces dernières années en raison de ses avantages environnementaux et de son accessibilité croissante. Les deux types les plus connus d'exploitation de l'énergie solaire sont :

- Énergie photovoltaïque PV qui est la conversion de la lumière du soleil en électricité à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques.
- Énergie solaire concentrée (CSP) qui utilise des miroirs ou des lentilles pour concentrer la lumière solaire sur un récepteur, généralement une tour ou un collecteur parabolique

3.1.1 Système photovoltaïque solaire :

Le type d'énergie renouvelable qui utilise des modules PV pour convertir les radiations solaires en énergie électrique est appelé système solaire photovoltaïque ou système SPV. L'électricité produite par le système SPV peut être soit stockée, soit directement utilisée à des fins utiles. Parfois, une quantité supplémentaire d'énergie électrique est injectée dans le réseau principal ou combinée avec d'autres sources d'énergie renouvelable. Le "système solaire photovoltaïque" garantit une source d'énergie électrique propre et fiable pour une large gamme d'applications telles que l'élevage, l'agriculture, l'industrie et les résidences, etc. [1]

Les cellules PV sont faites de silicium, matériel semi-conducteur et photosensible, qui a la propriété de libérer des électrons sous l'influence du soleil. On obtient ainsi la production d'un courant électrique.

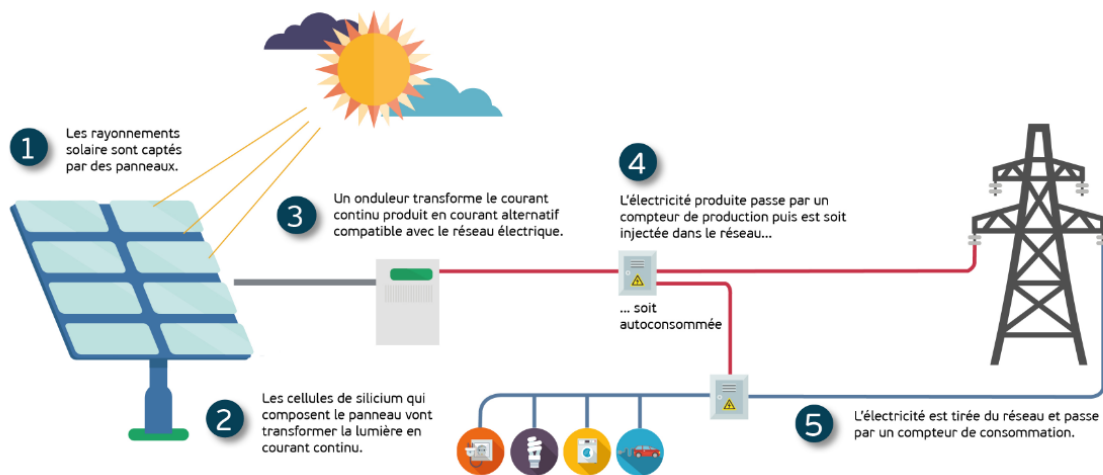


Figure 1. Principe de fonctionnement de l'énergie solaire PV[6]

3.1.2 Énergie solaire thermique :

Cette technologie utilise des miroirs ou des lentilles pour concentrer la lumière solaire sur un récepteur, généralement une tour ou un collecteur parabolique. Le récepteur contient un fluide de transfert de chaleur qui est chauffé par la lumière concentrée. La chaleur est ensuite utilisée pour générer de la vapeur qui fait tourner une turbine reliée à un générateur électrique, produisant ainsi de l'électricité. Les centrales solaires concentrées sont généralement utilisées dans de grands projets de production d'électricité à grande échelle.

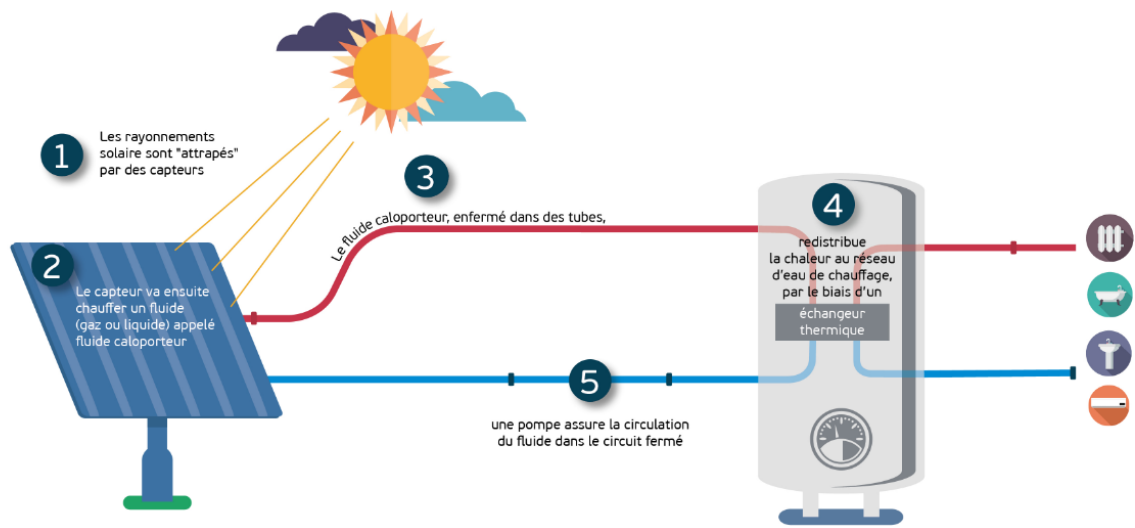


Figure 2. Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique[6]

3.1.3 Défis concernant l'énergie solaire :

Bien que l'énergie solaire présente de nombreux avantages, son adoption à grande échelle présente également des défis. La nature intermittente de la lumière du soleil nécessite des solutions de stockage de l'énergie pour garantir un approvisionnement continu en électricité lorsque la lumière du soleil est indisponible, comme pendant la nuit ou les jours nuageux. De plus, les coûts initiaux d'installation des systèmes solaires peuvent être élevés, bien que ces coûts diminuent régulièrement ces dernières années. Cependant, les économies à long terme et les avantages environnementaux compensent souvent les dépenses initiales.

En parallèle de la réduction des coûts de l'énergie générée par les technologies solaires photovoltaïques classiques, les avancées et l'augmentation de l'efficacité des technologies de l'énergie solaire concentrée aux États-Unis[7] ont également réduit le coût de l'électricité dans l'industrie de l'énergie solaire. Cependant, il existe également des effets négatifs causés par les technologies solaires, tels que des impacts sur l'esthétique des bâtiments, des rejets chimiques réguliers et accidentels, l'utilisation des terres, etc.

3.2 L'énergie biomasse :

L'énergie biomasse désigne l'énergie générée à partir de matières organiques telles que les végétaux, les déchets agricoles, les granulés de bois et les déchets animaux. Il s'agit d'une source d'énergie renouvelable qui peut être utilisée pour le chauffage, la production d'électricité et comme substitut aux combustibles fossiles dans diverses industries.

Les ressources énergétiques à base de biomasse contiennent une quantité importante d'énergie solaire stockée. Les plantes absorbent une énorme quantité d'énergie solaire pour préparer leurs composés organiques à partir de substances inorganiques plus simples, grâce à un processus bien connu appelé "photosynthèse". En brûlant de la biomasse, l'énergie chimique

stockée dans la biomasse est libérée sous forme d'énergie thermique. La biomasse peut être soit brûlée directement, soit convertie en "biogaz" ou en "biocarburants" pour être utilisée comme source d'énergie. Voici quelques exemples courants de ressources énergétiques à base de biomasse et de leurs applications[1] :

- le bois naturel ou les déchets de traitement du bois sont brûlés directement pour chauffer les maisons et les bureaux et sont également utilisés pour générer de l'énergie électrique,
- les déchets et toutes les cultures agricoles sont brûlés comme combustible pour être transformés en biocarburants liquides,
- les déchets de bois, les déchets de jardin et de nourriture sont également brûlés pour produire de l'électricité dans les centrales électriques conventionnelles, et même transformés en biogaz dans les décharges profondes, et
- les eaux usées humaines et le fumier animal sont convertis en biogaz pour être directement brûlés comme combustible.



Figure 3 Ressources génératrices de biomasse[8]

3.2.1 Avantages environnementaux de la biomasse :

L'un des principaux avantages de l'utilisation des ressources énergétiques à base de biomasse est la production plus propre d'énergie, avec des émissions minimales de gaz à effet de serre. L'utilisation de déchets comme combustible dans le système d'énergie verte contribue à prévenir la surcharge des décharges naturelles, ce qui augmente le taux de décomposition de la matière organique au sol de la forêt. En pratique, les nouvelles installations de recyclage sont capables de recycler jusqu'à 80 % des matériaux de construction démolis reçus. En moyenne, près de trente millions de tonnes de matière organique sont détournées des flux de déchets et converties en matériaux réutilisables. Les ressources énergétiques à base de biomasse représentent près de 4 % de la capacité totale de production d'électricité aux États-Unis, avec des réductions significatives des émissions de dioxyde de carbone. Selon les estimations de l'"Association de l'énergie biomasse", près de quinze millions de tonnes de dioxyde de carbone sont réduites chaque année grâce à l'utilisation de ressources énergétiques à base de biomasse.

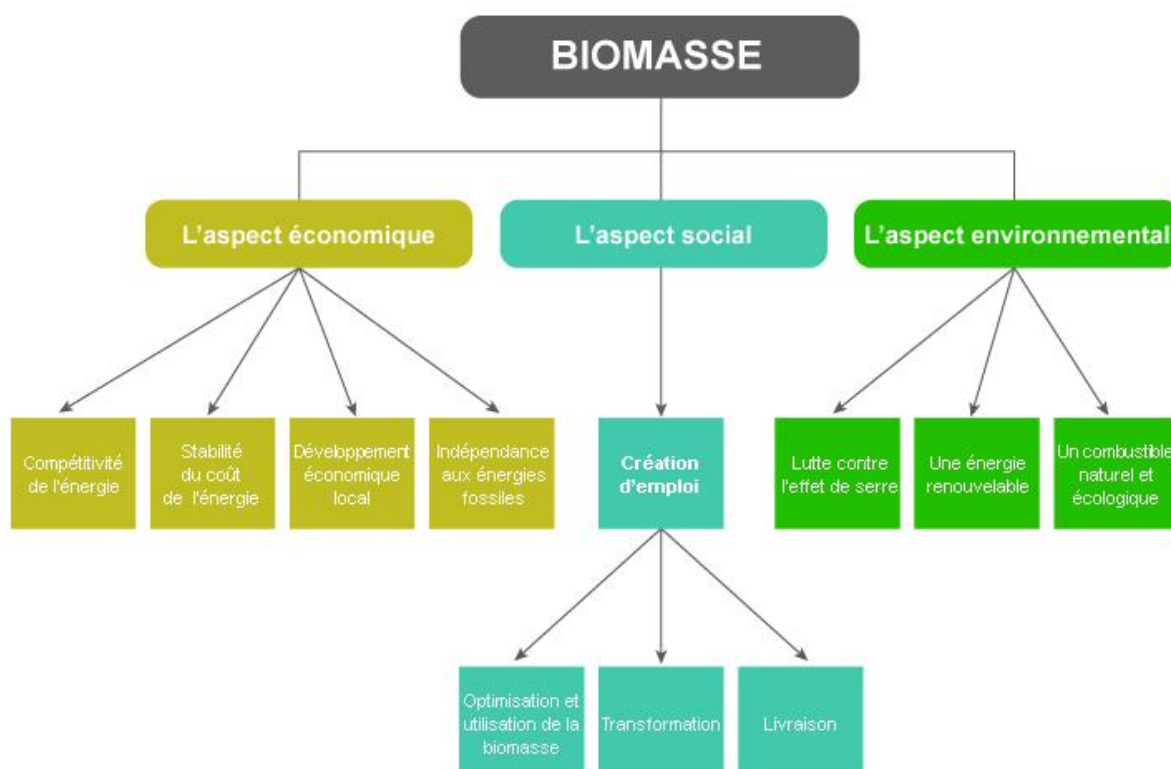


Figure 4. Les avantages de la biomasse[9]

3.3 L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique, également appelée énergie hydroélectrique, est l'énergie générée par le mouvement de l'eau. Elle est obtenue en exploitant la force de l'eau en mouvement, telle que les chutes d'eau, les rivières ou les marées. L'énergie hydraulique est l'une des formes les plus anciennes d'énergie renouvelable utilisées par l'homme.

L'énergie hydraulique a joué un rôle important dans le fonctionnement sûr, stable et efficace des systèmes électriques depuis longtemps. L'hydroélectricité génère non seulement de l'électricité en tant que plus grande source d'énergie renouvelable mondiale, mais elle assume également une grande partie de la régulation et de l'équilibrage dans de nombreux systèmes électriques à travers le monde[10].

3.3.1 Principe de l'énergie hydraulique :

Une centrale hydroélectrique utilise de nombreux procédés et sous-systèmes, dont un ou plusieurs groupes turbine-alternateur actionnés par l'eau. Les types d'exploitation de l'énergie hydraulique les plus courants sont :

3.3.1.1 Les centrales hydrauliques à réservoir :

Ces centrales utilisent un barrage pour créer un réservoir d'eau qui peut être libérée pour faire tourner des turbines et générer de l'électricité. L'eau est stockée dans le réservoir lorsque la demande d'électricité est faible, puis relâchée lorsque la demande augmente, permettant une production régulière d'énergie.

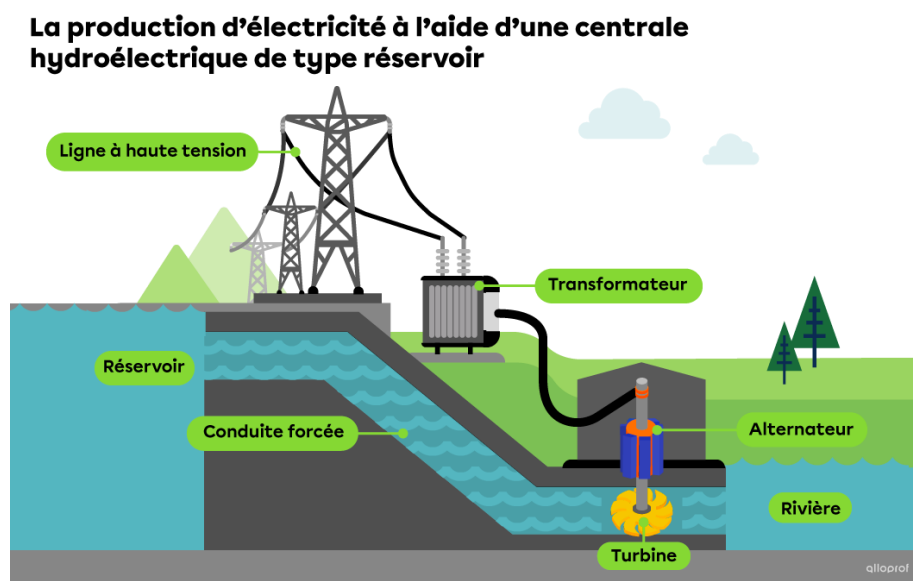


Figure 5. Production d'électricité à l'aide d'une centrale hydroélectrique à réservoir[11]

3.3.1.2 Les centrales hydrauliques au fil de l'eau :

Ces centrales utilisent le flux naturel des cours d'eau pour faire tourner les turbines et produire de l'électricité. Elles ne nécessitent pas de réservoir, mais dépendent du débit constant de l'eau pour maintenir la production d'énergie.

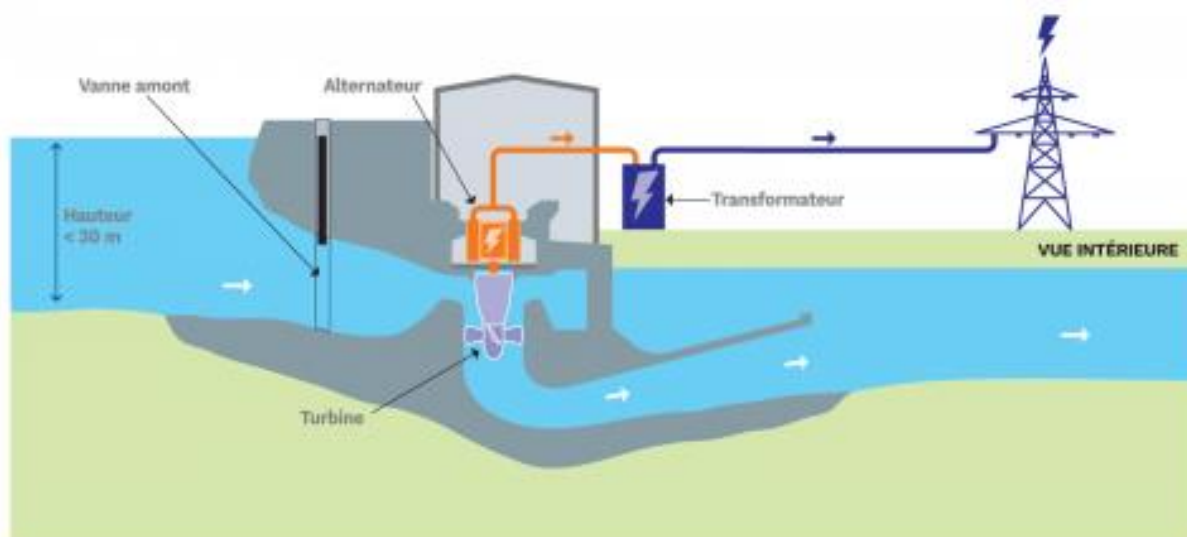


Figure 6. Production d'électricité à l'aide d'une centrale hydroélectrique au fil d'eau[12]

3.3.1.3 Les centrales marémotrices :

Ces centrales exploitent les marées et les courants marins pour générer de l'électricité. Elles utilisent des turbines spéciales qui sont activées par les mouvements de l'eau causés par les marées montantes et descendantes.

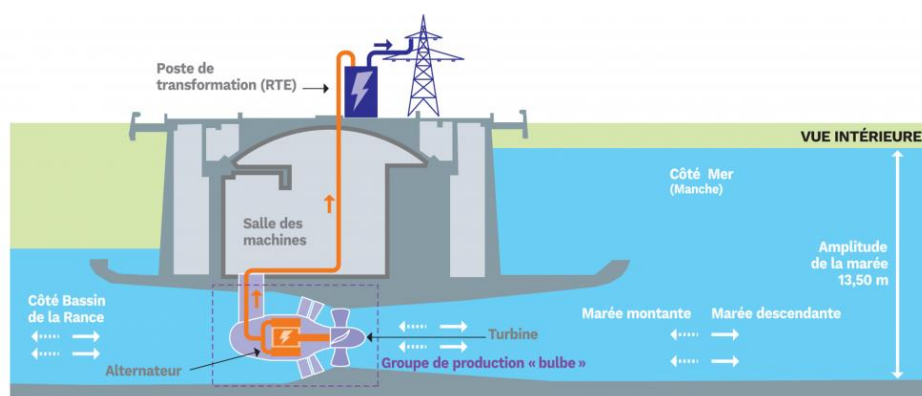


Figure 7. Production d'électricité à l'aide d'une centrale hydroélectrique marémotrice[12]

3.3.1.4 Les centrales de pompage-turbinage :

Ces centrales utilisent deux réservoirs d'eau à des altitudes différentes. Lorsque la demande d'électricité est faible, l'eau est pompée du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur. Lorsque la demande d'électricité est élevée, l'eau est relâchée du réservoir supérieur vers le réservoir inférieur en passant par des turbines pour produire de l'électricité.

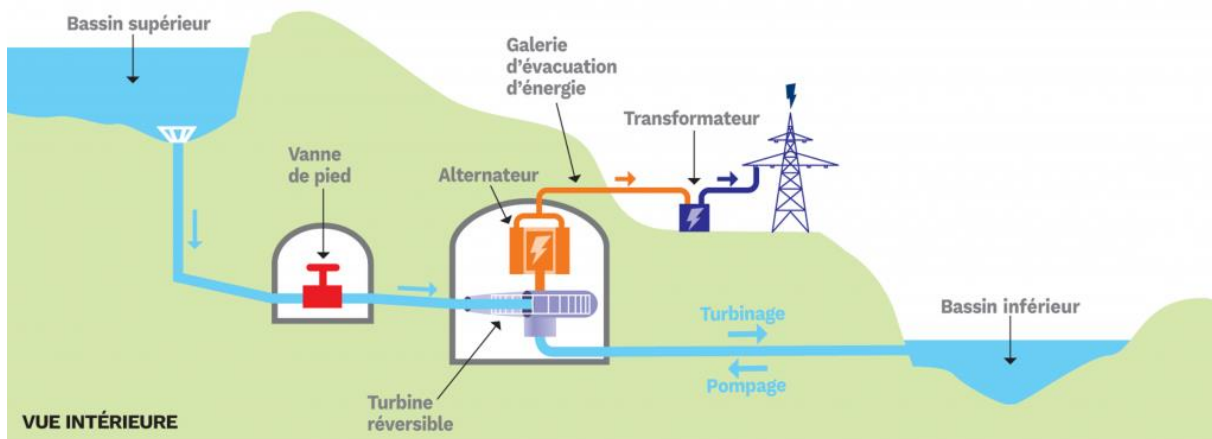


Figure 8. Production d'électricité à l'aide d'une centrale hydroélectrique pompage-turbinage[12]

3.4 L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique désigne la chaleur naturelle produite à l'intérieur de la Terre. C'est une forme d'énergie renouvelable qui exploite la chaleur emmagasinée dans le sol pour la convertir en électricité ou en chaleur utilisable. Les ressources géothermiques proviennent de différentes sources, allant des eaux souterraines peu profondes aux sources d'eau chaude profondes. Les zones géothermiques peuvent varier en termes de température et de profondeur, et certaines régions sont plus propices à l'exploitation de cette énergie que d'autres. Les systèmes géothermiques peuvent être utilisés pour le chauffage, la climatisation et la production d'électricité, offrant ainsi une source d'énergie propre et durable.

3.4.1 Méthode d'exploitation de la géothermie :

La méthode d'exploitation de l'énergie géothermique dépend de la ressource géothermique disponible dans une région donnée. Voici quelques-unes des méthodes les plus courantes :

3.4.1.1 Centrale géothermique à vapeur sèche :

Cette méthode est utilisée lorsque des sources d'eau chaude à haute température (supérieure à 150 degrés Celsius) sont présentes en profondeur. L'eau est pompée à la surface, où la pression est abaissée, ce qui permet à l'eau de se transformer en vapeur sèche. La vapeur est ensuite utilisée pour faire tourner une turbine reliée à un générateur, produisant ainsi de l'électricité.

3.4.1.2 Centrale géothermique à vapeur flash :

Cette méthode est utilisée lorsque l'eau souterraine est à une température élevée, mais à une pression plus basse. L'eau est pompée à la surface et rapidement libérée dans un réservoir à basse pression, ce qui entraîne une évaporation instantanée et la formation de vapeur. La vapeur est ensuite utilisée pour générer de l'électricité.

3.4.1.3 Centrale géothermique à cycle binaire :

Cette méthode est utilisée lorsque la température de l'eau géothermique est relativement basse (entre 70 et 150 degrés Celsius). L'eau chaude est utilisée pour chauffer un fluide à bas point d'ébullition, comme l'isobutane ou l'ammoniac. Ce fluide vaporisé fait tourner une turbine reliée à un générateur, produisant de l'électricité.

3.4.1.4 Systèmes de chauffage géothermique :

Cette méthode utilise la chaleur géothermique pour le chauffage direct des bâtiments. Des pompes à chaleur géothermiques sont utilisées pour extraire la chaleur du sol ou de l'eau géothermique et la transférer à l'intérieur des bâtiments pour le chauffage et la production d'eau chaude.

3.5 L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable produite à partir de la force du vent. Elle est transformée en électricité par des dispositifs appelés éoliennes ou turbines éoliennes. Voici comment fonctionne généralement l'exploitation de l'énergie éolienne :

- **Éoliennes** : Les éoliennes sont composées de pales et d'un rotor qui tournent lorsque le vent souffle. Les pales capturent l'énergie cinétique du vent et font tourner le rotor.
- **Générateur** : Le rotor est relié à un générateur à l'intérieur de l'éolienne. Lorsque le rotor tourne, il fait tourner l'arbre du générateur, qui produit de l'électricité grâce à cette rotation.
- **Réseau électrique** : L'électricité produite par les éoliennes est acheminée vers un poste de transformation où sa tension est ajustée pour être injectée dans le réseau électrique existant. Elle peut ensuite être distribuée aux consommateurs.
- **Stockage ou utilisation directe** : Dans certains cas, l'électricité peut être stockée dans des batteries ou utilisée directement pour alimenter des systèmes locaux tels que l'éclairage ou les pompes.

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages en tant que source d'énergie propre et renouvelable, contribuant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Elle est abondante et disponible dans de nombreuses régions du monde. Cependant, sa production dépend de la disponibilité du vent, ce qui peut entraîner une certaine variabilité. De plus, l'installation d'éoliennes doit prendre en compte des facteurs tels que la vitesse et la direction du vent, les considérations environnementales et les besoins de la communauté locale.

3.5.1 Les éoliennes terrestres/offshores :

Les éoliennes terrestres et offshores sont des technologies matures et largement utilisées pour la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne. Elles offrent des avantages en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'indépendance énergétique et de création d'emplois locaux. Cependant, chaque type d'éolienne présente des considérations spécifiques en termes de coûts, d'impact environnemental, de réglementation et de logistique liées à leur installation et à leur exploitation.

3.5.1.1 Les éoliennes terrestres :

Les éoliennes terrestres sont des structures installées sur la terre ferme, généralement dans des zones venteuses telles que des collines, des plaines ou des zones côtières. Elles sont composées de pales qui captent l'énergie cinétique du vent et les transforment en électricité. Ces éoliennes sont montées sur des tours de différentes hauteurs en fonction des conditions locales et peuvent varier en taille et en capacité. Elles sont utilisées à différentes échelles, allant des

petites éoliennes individuelles utilisées pour alimenter des maisons isolées, aux grands parcs éoliens où plusieurs éoliennes sont regroupées pour alimenter un réseau électrique plus large.



Figure 9. Parc éolien terrestre

3.5.1.2 Les éoliennes offshore :

Les éoliennes offshore sont des éoliennes installées en mer, généralement près des côtes ou dans des eaux plus profondes. Elles peuvent être fixées au fond marin ou montées sur des structures flottantes. Les éoliennes offshore bénéficient de vents plus forts et plus constants que les éoliennes terrestres, ce qui leur permet de produire davantage d'électricité. Elles sont souvent regroupées en parcs éoliens en mer, formant ainsi des fermes éoliennes offshore.



Figure 10. Parc d'éoliennes offshore

4 Avantages et inconvénients :

C'est à cause de leurs avantages que le monde est en train de faire une transition concernant les sources de l'énergie, des sources classiques ayant les hautes émissions de CO² vers les énergies renouvelables, on va mentionner dans les prochaines lignes quelques bénéfices des énergies renouvelables :

- **Durabilité environnementale :** Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique, ont une empreinte carbone nettement plus faible par rapport aux combustibles fossiles. Elles produisent peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur exploitation, contribuant ainsi à atténuer le changement climatique et à réduire la pollution de l'air.
- **Sécurité énergétique et indépendance :** En diversifiant le mix énergétique et en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles importés, les énergies renouvelables renforcent la sécurité et l'indépendance énergétique des pays. Elles utilisent des ressources disponibles localement, réduisant ainsi la vulnérabilité aux fluctuations des prix et aux tensions géopolitiques liées aux importations de combustibles fossiles.
- **Création d'emplois et croissance économique :** Le secteur des énergies renouvelables est un moteur important de création d'emplois et de croissance économique. Les investissements dans les projets d'énergies renouvelables stimulent les économies locales, créent une large gamme d'opportunités d'emploi et favorisent l'innovation et les avancées technologiques.
- **Rentabilité et stabilité des prix :** Les coûts des technologies des énergies renouvelables ont considérablement diminué au fil des ans, les rendant de plus en plus compétitives par rapport aux combustibles fossiles. De plus, les sources d'énergie renouvelable offrent une stabilité des prix à long terme, car elles ne sont pas soumises à la volatilité des prix des combustibles fossiles, qui peuvent fluctuer en raison d'événements géopolitiques ou de perturbations de l'approvisionnement.
- **Accès à l'énergie et développement rural :** Les systèmes d'énergie renouvelable peuvent fournir un accès à l'électricité dans les zones éloignées et mal desservies qui ne sont pas connectées au réseau électrique traditionnel. Les solutions renouvelables hors réseau, telles que les panneaux solaires et les mini-réseaux, offrent un accès à une énergie fiable et durable, contribuant au développement rural et améliorant la qualité de vie des communautés.
- **Conservation de l'eau et des terres :** Contrairement à la production d'énergie conventionnelle qui nécessite souvent une consommation d'eau importante et une utilisation des terres considérable, la plupart des technologies d'énergie renouvelable ont des besoins en eau minimes et peuvent être intégrées aux infrastructures existantes. Cela réduit la pression sur les ressources en eau et préserve des terres précieuses pour d'autres utilisations telles que l'agriculture ou la conservation.
- **Avantages pour la santé publique :** La transition vers les énergies renouvelables apporte d'importants avantages pour la santé publique en réduisant la pollution de l'air et les risques sanitaires qui y sont associés. En remplaçant la combustion des combustibles fossiles par des sources d'énergie propres, les énergies renouvelables contribuent à améliorer la qualité de l

Comme l'énergie renouvelable présente une solution effective pour finir la dépendance des sources d'énergies non renouvelables qui ne dureront pas éternellement ainsi que leurs effets négatifs sur l'environnement, les énergies vertes présentent également certains inconvénients, notamment :

- **Intermittence et dépendance des conditions météorologiques :** Les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne sont dépendantes des conditions météorologiques. L'absence de soleil ou de vent peut entraîner une production d'énergie réduite, ce qui peut rendre la fourniture d'électricité moins fiable.
- **Coûts initiaux élevés :** Les coûts initiaux d'installation des systèmes d'énergies renouvelables, tels que les panneaux solaires et les éoliennes, peuvent être élevés. Bien que les coûts aient considérablement diminué ces dernières années, les investissements initiaux peuvent encore constituer un frein pour certaines personnes ou organisations.
- **Besoin de vastes espaces :** Les énergies renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne nécessitent souvent de vastes espaces de terre ou d'eau pour l'installation de panneaux solaires, de parcs éoliens ou de centrales hydroélectriques. Cela peut poser des défis en termes de disponibilité foncière et d'acceptation sociale dans certaines régions.
- **Impact sur l'environnement local :** Bien que les énergies renouvelables produisent moins d'émissions de gaz à effet de serre par rapport aux combustibles fossiles, elles peuvent avoir un certain impact sur l'environnement local. Par exemple, la construction de barrages hydroélectriques peut entraîner la destruction d'habitats naturels et perturber les écosystèmes aquatiques.
- **Dépendance à des matériaux spécifiques :** Certaines technologies d'énergie renouvelable, comme les batteries utilisées dans le stockage de l'énergie, dépendent de l'utilisation de matériaux rares ou coûteux. Cela soulève des questions concernant la disponibilité de ces matériaux à grande échelle et les impacts environnementaux associés à leur extraction et à leur traitement.
- **Intégration au réseau électrique :** L'intégration des énergies renouvelables au réseau électrique existant peut poser des défis techniques. L'augmentation de la production d'énergie variable peut nécessiter des mises à niveau des infrastructures électriques pour assurer une stabilité du réseau et une gestion efficace de l'équilibre entre l'offre et la demande.

5 Conclusion :

Les énergies renouvelables ont un potentiel considérable en tant que solution durable à nos besoins énergétiques. Elles offrent de nombreux avantages, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la qualité de l'air et la sécurité énergétique. Avec les avancées technologiques et la baisse des coûts, les énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolien, l'hydroélectricité et la géothermie deviennent de plus en plus compétitives par rapport aux combustibles fossiles. Elles ont la capacité de transformer notre paysage énergétique, en fournissant une énergie propre et fiable tout en réduisant notre dépendance à des ressources limitées. Cependant, des défis tels que l'intermittence, le stockage et l'infrastructure doivent être résolus pour leur adoption généralisée. En investissant dans la recherche, le développement et des politiques de soutien, nous pouvons libérer tout le potentiel des énergies renouvelables et créer un avenir énergétique plus propre et plus résilient.

L'étude et la simulation des différents types et ressources des énergies renouvelable est essentiel pour l'amélioration et la résolution des défis concernant ce domaine, Prochainement dans notre thèse on va s'intéresser de l'un des turbines utilisées à la conversion de l'énergie éolienne, c'est l'éolienne a base MADA (Machine Asynchrone Doublement Alimentée).

Chapitre 2

Eolienne basée sur une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

CHAPITRE 2 : ÉOLIENNE BASÉE SUR UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

1 Introduction :

Une éolienne basée sur une génératrice à induction doublement alimentée (MADA) est un type d'éolienne utilisant une génératrice à induction spéciale qui comporte deux enroulements : le stator et le rotor. Le stator est connecté directement au réseau électrique et génère une sortie électrique à fréquence fixe, tandis que le rotor est connecté au réseau via des convertisseurs électroniques de puissance. La caractéristique clé de cette technologie réside dans la capacité du rotor à fonctionner à vitesse variable, indépendamment de la fréquence du réseau, permettant ainsi une meilleure adaptation aux conditions de vent changeantes. Grâce à un système de contrôle sophistiqué, une éolienne MADA peut optimiser la capture d'énergie éolienne, améliorer l'intégration au réseau électrique et offrir une meilleure stabilité en cas de perturbations. Cette technologie est largement utilisée dans les parcs éoliens modernes en raison de ses avantages en termes de contrôle de puissance et d'efficacité énergétique accrue.

La machine asynchrone à double alimentation est un type de machine électrique tournante utilisée dans les éoliennes pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Elle est composée de deux enroulements statoriques distincts : un enroulement alimenté par le réseau électrique et un autre enroulement alimenté par un convertisseur de puissance électronique.

La machine asynchrone à double alimentation est généralement utilisée en combinaison avec un générateur synchrone pour former un système de conversion d'énergie éolienne. Lorsque le vent tourne les pales de l'éolienne, cela entraîne une rotation du rotor de la machine asynchrone à double alimentation, qui génère un courant électrique dans les deux enroulements statoriques.

Le convertisseur de puissance électronique est utilisé pour contrôler la fréquence et la tension de l'enroulement secondaire, ce qui permet de réguler la vitesse de rotation du rotor. Le courant électrique généré par la machine est ensuite envoyé à un système de contrôle de puissance qui le convertit en une forme adaptée pour l'injection dans le réseau électrique.

La machine asynchrone à double alimentation est particulièrement bien adaptée aux éoliennes car elle permet une régulation fine de la vitesse de rotation, ce qui permet d'optimiser l'efficacité de l'éolienne en fonction des conditions de vent. Elle offre également un meilleur rendement et une plus grande stabilité de fonctionnement par rapport à d'autres types de machines électriques.

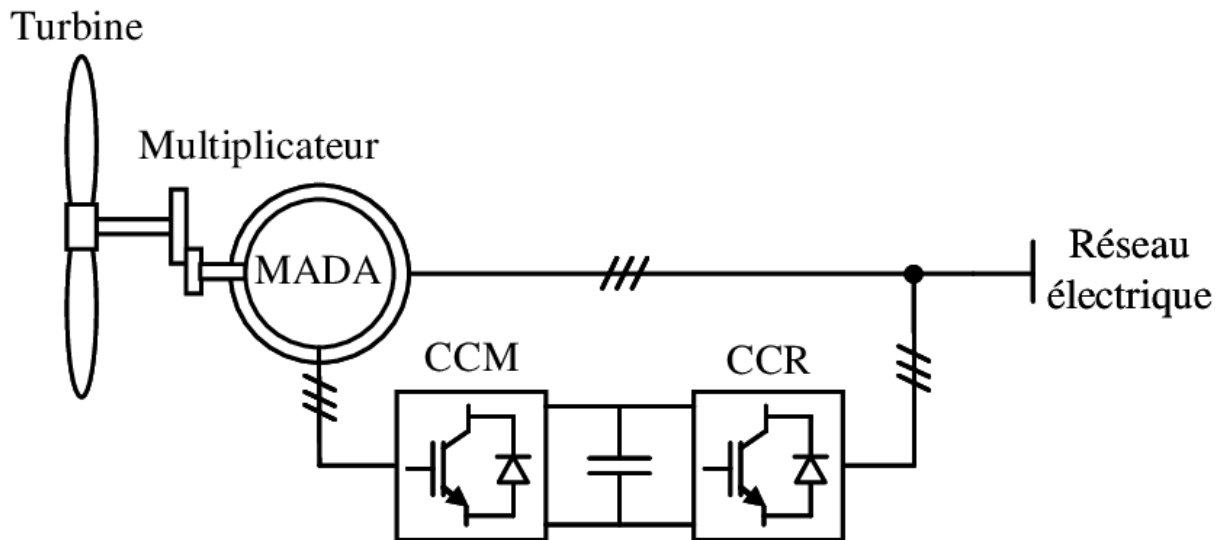


Figure 11. Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA[13]

Les termes CCR et CCM font référence à des composants électroniques utilisés pour contrôler le système de conversion d'énergie éolienne.

CCR signifie Convertisseur Coté Réseau, c'est-à-dire le convertisseur côté réseau. Le CCR est un composant électronique qui permet de réguler la puissance électrique injectée dans le réseau électrique à partir de l'éolienne. Le CCR contrôle la fréquence et la tension du courant alternatif produit par la MADA en ajustant la fréquence et la phase du courant injecté dans le réseau.

CCM signifie Convertisseur Coté Machine, c'est-à-dire le convertisseur côté rotor. Le CCM est un composant électronique qui permet de contrôler la puissance électrique fournie au rotor de la MADA. Le CCM contrôle la fréquence et la tension du courant alternatif alimentant l'enroulement rotorique de la machine, ce qui permet de réguler la vitesse de rotation du rotor.

En combinant le CCR et le CCM, il est possible de réguler la puissance de sortie de l'éolienne en fonction des conditions de vent et des exigences du réseau électrique. Le CCR et le CCM travaillent ensemble pour contrôler la vitesse de rotation de la MADA et la puissance électrique produite par l'éolienne. Cette régulation fine permet d'optimiser l'efficacité de l'éolienne en fonction des conditions de vent, tout en assurant la stabilité et la qualité de l'énergie produite injectée dans le réseau électrique.

2 Architecture d'une éolienne avec MADA :

L'architecture d'une éolienne basée sur une génératrice à induction doublement alimentée (DFIG) comprend généralement plusieurs composants clés qui travaillent ensemble pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique,

Un rotor avec des pales pour capter l'énergie éolienne, une boîte de vitesses pour augmenter la vitesse de rotation, une génératrice MADA avec des enroulements de stator et de rotor, des convertisseurs électroniques de puissance pour contrôler les variables du rotor, des

balais et des bagues de déviation pour la connexion électrique, un système de contrôle pour la surveillance et l'optimisation, et une connexion au réseau pour le transfert de la sortie électrique vers le réseau.

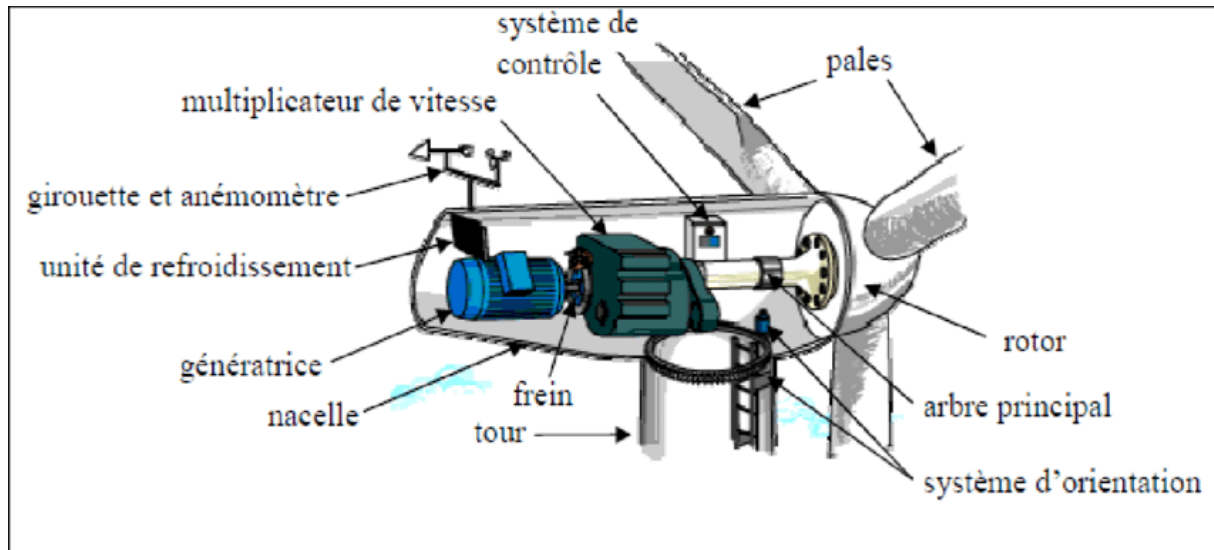


Figure 12. Les éléments principaux d'une éolienne[14]

2.1 Le rotor principal :

Le rotor principal ou rotor de l'éolienne s'agit de la partie de l'éolienne qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utilisée pour générer de l'électricité, il est composé de plusieurs pales aérodynamiques fixées à un moyeu central. Les pales sont conçues pour capter l'énergie du vent lorsque celui-ci les frappe. Lorsque le vent souffle, il exerce une force sur les pales, ce qui fait tourner le rotor.

Le rotor est connecté à un arbre principal qui transfère le mouvement rotatif à un multiplicateur de vitesse qui va ensuite exercer le générateur à l'intérieur de l'éolienne. Le générateur utilise ensuite ce mouvement pour produire de l'électricité.

La conception et la taille du rotor extérieur varient en fonction de la taille de l'éolienne. Les éoliennes commerciales de grande taille ont généralement des rotors extérieurs de plusieurs dizaines de mètres de diamètre, tandis que les éoliennes plus petites utilisées pour des applications résidentielles ou communautaires ont des rotors plus petits.

En résumé, le rotor extérieur d'une éolienne est la partie qui capte l'énergie du vent et la convertit en énergie mécanique utilisée pour générer de l'électricité.

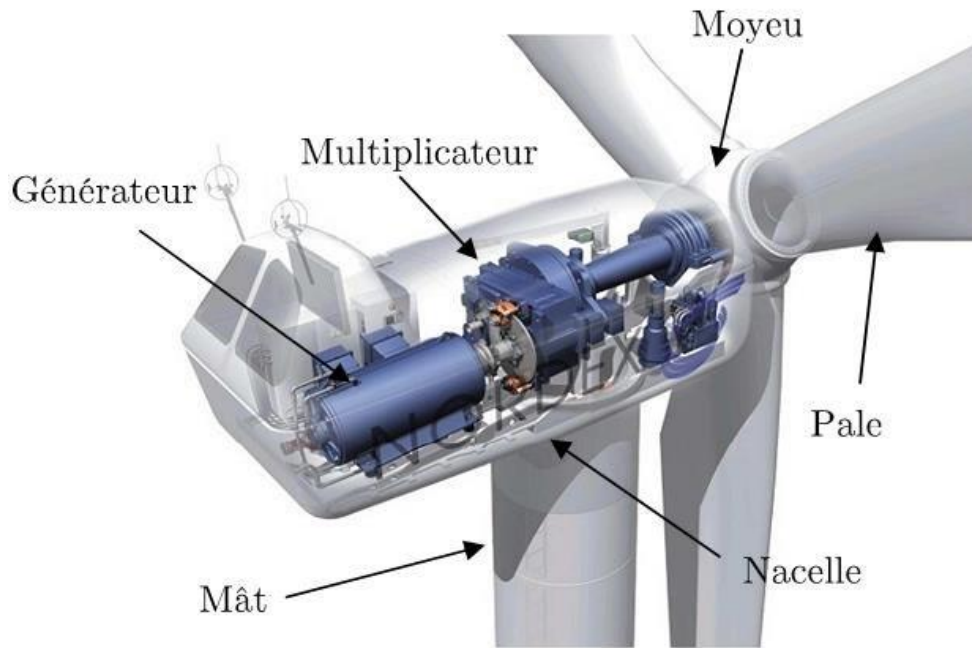


Figure 13. Constitution d'une éolienne[15]

2.2 Le multiplicateur :

La vitesse de rotation de l'hélice est de 12 à 15 tours/min[16], ce qui n'est pas suffisant à un alternateur pour fonctionner correctement. Un multiplicateur de vitesse est donc placé juste avant l'alternateur pour augmenter la vitesse de rotation à environ 1 500 tours/ min, cette opération va donner plus de rotation/temps au détriment de la valeur de couple inférieure.

D'après la figure 4 on peut constater que le multiplicateur est constitué de 4 unités principaux[17],

- L'arbre haut vitesse est supporté par les roulements à haute vitesse que l'on retrouve à l'avant et sur les côtés arrière de celui-ci, qui peut tourner de à des vitesses de rotation maximales.
- L'arbre intermédiaire est situé entre les arbres haute et basse et supporté par les roulements à haute vitesse situés à l'avant et sur les côtés arrière de l'arbre.
- L'action du vent sur la turbine varie en fonction du relief, de la hauteur par rapport au sol et des turbulences causées par le changement de température. Les variations de cette force imposent de lourdes charges à la boîte de vitesse. L'engrenage planétaire et les roulements de l'étage planétaire permettent d'absorber ces variations.
- Les engrenages servent à absorber les stress dus au vent qui s'applique sur les pales des turbines.

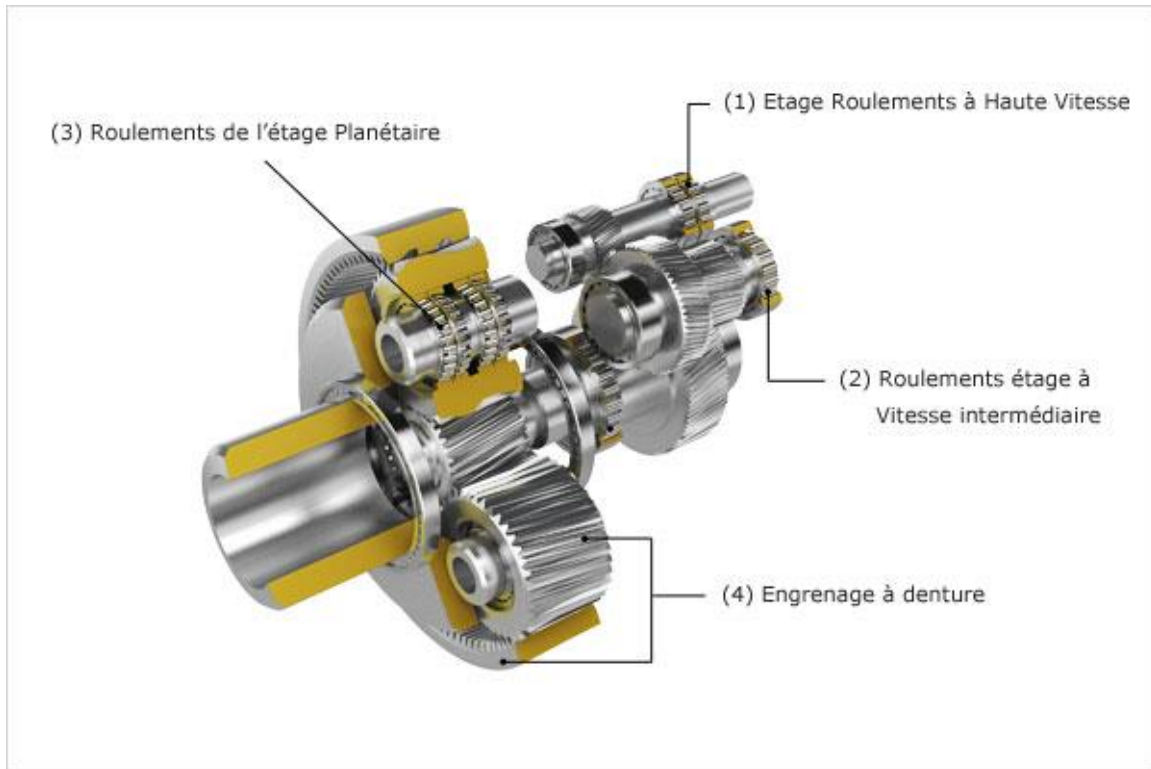


Figure 14. Structure interne d'un multiplicateur d'une éolienne[17]

2.3 La MADA :

Une machine asynchrone doublement alimentée est un type de machine électrique qui est capable de fonctionner avec deux sources d'alimentation distinctes. Elle est composée d'un stator et d'un rotor, tout comme une machine asynchrone conventionnelle, mais elle dispose également de deux enroulements d'alimentation distincts.

L'un des enroulements, appelé enroulement principal ou stator, est alimenté par le réseau électrique conventionnel. Il crée un champ magnétique tournant qui interagit avec le rotor pour produire le couple de rotation.

Le deuxième enroulement, appelé enroulement auxiliaire ou rotor, est alimenté par une source d'énergie externe, généralement un convertisseur électronique de puissance. Cela permet de contrôler de manière indépendante la vitesse et le couple de la machine. L'enroulement auxiliaire peut également être utilisé pour réguler la puissance réactive et améliorer les performances du système électrique global.

La combinaison de ces deux sources d'alimentation permet à la machine asynchrone doublement alimentée de présenter des avantages par rapport aux machines asynchrones conventionnelles, notamment une meilleure flexibilité de contrôle, une meilleure efficacité énergétique et une capacité accrue à absorber les variations de charge et à fournir de la puissance réactive.

Ces machines sont souvent utilisées dans les applications nécessitant une régulation fine de la vitesse, telles que les éoliennes, les groupes électrogènes, les centrales hydroélectriques et les systèmes de transmission d'énergie.



Figure 15. Machine asynchrone doublement alimentée (ABB)[18]

2.3.1 Caractéristiques d'une machine asynchrone à double alimentation :

Une machine MADA possède les caractéristiques suivantes[19] :

- Un stator cylindrique qui possède sur sa face interne un ensemble de rainures (généralement 36 à 48), dans lesquelles se trouvent les enroulements triphasés, créant un champ magnétique dans l'entrefer avec deux ou trois paires de pôles.
- Un rotor cylindrique qui possède sur sa face externe un ensemble de rainures, dans lesquelles se trouvent les enroulements triphasés, créant un champ magnétique dans l'entrefer avec la même paire de pôles que le stator.
- Le champ magnétique créé par les enroulements du stator et du rotor doit tourner à la même vitesse mais avec un décalage de phase de quelques degrés en fonction du couple créé par la machine.
- Étant donné que le rotor est une partie tournante de la machine, il est nécessaire d'avoir trois bagues collectrices pour l'alimenter. L'assemblage des bagues collectrices nécessite de l'entretien et compromet la fiabilité, le coût et l'efficacité du système.



Figure 16. Représentation CAD de la MADA[19]

2.4 Les convertisseurs CCR et CCM :

Dans une éolienne, les convertisseurs AC/DC/AC jouent un rôle essentiel dans le processus de conversion et de gestion de l'énergie électrique. Ces convertisseurs sont également connus sous le nom de convertisseurs de puissance ou d'électronique de puissance.

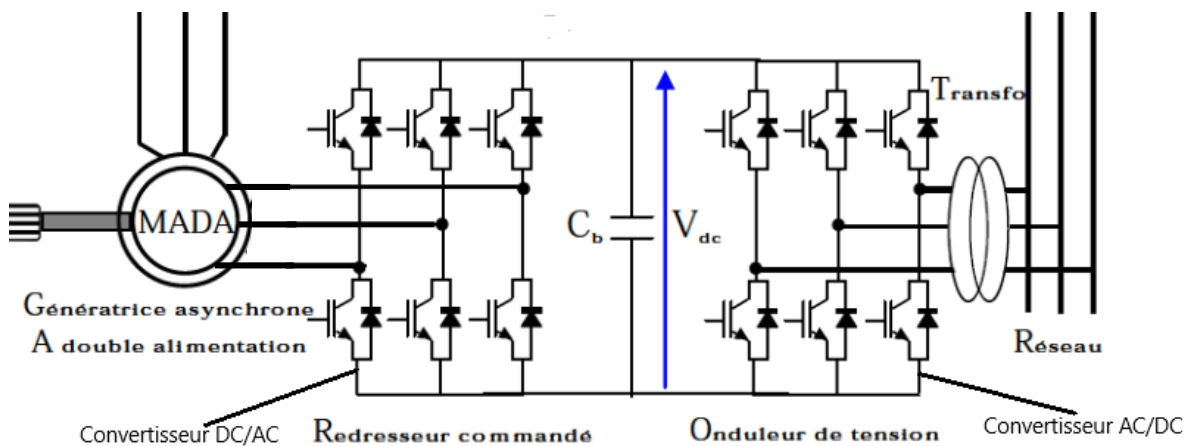


Figure 17. Convertisseurs CCR et CCM dans un système basé sur une MADA

Voici comment fonctionnent généralement les convertisseurs AC/DC/AC dans une éolienne :

1. **Conversion AC/DC** : La première étape consiste à convertir l'énergie électrique produite par l'éolienne, qui est généralement en courant alternatif (AC), en courant continu (DC) utilisable. Cela est réalisé à l'aide d'un convertisseur AC/DC, souvent appelé redresseur.

Il transforme le courant alternatif produit par le générateur de l'éolienne en courant continu, qui est ensuite utilisé pour alimenter d'autres composants du système.

2. Conversion DC/AC : La deuxième étape est de convertir le courant continu en courant alternatif. Cela est nécessaire pour fournir de l'électricité au réseau électrique ou à un utilisateur final. Un autre convertisseur, appelé onduleur, est utilisé pour effectuer cette conversion. L'onduleur convertit le courant continu provenant du redresseur en courant alternatif à la fréquence et à la tension requise, conformément aux normes du réseau électrique.
3. Contrôle et gestion de la puissance : Les convertisseurs AC/DC/AC d'une éolienne sont également responsables du contrôle et de la gestion de la puissance. Ils permettent de réguler la vitesse de rotation du rotor, d'optimiser l'efficacité de l'éolienne et de gérer la connexion à la grille électrique. Ils peuvent également gérer la production d'énergie réactive et assurer la synchronisation avec la fréquence et la tension du réseau.



Figure 18. Convertisseur d'une MADA fabriqué par ingetteam [20]

2.5 Les bagues collectrices :

Les bagues collectrices d'une éolienne sont des composants qui facilitent le transfert des signaux électriques et de la puissance entre la partie fixe (nacelle) et la partie rotative (rotor) de l'éolienne. Les bagues collectrices du rotor sont spécifiquement chargées de transmettre les signaux électriques et la puissance des capteurs et des systèmes de contrôle situés sur le rotor vers les systèmes fixes de la nacelle.

Les bagues collectrices du rotor se composent généralement d'un ensemble d'anneaux conducteurs montés sur le moyeu ou l'arbre principal en rotation de l'éolienne. Ces anneaux sont fabriqués à partir de matériaux tels que le cuivre ou d'autres alliages conducteurs afin d'assurer une conductivité électrique efficace. Le nombre d'anneaux peut varier en fonction de la complexité des connexions électriques requises.

Du côté fixe de l'éolienne, des balais en carbone ou en graphite sont montés dans une position fixe pour appuyer contre les anneaux en rotation. Ces balais maintiennent un contact constant avec les anneaux pendant que le rotor tourne, assurant ainsi la connexion électrique nécessaire à la transmission des signaux et de la puissance.

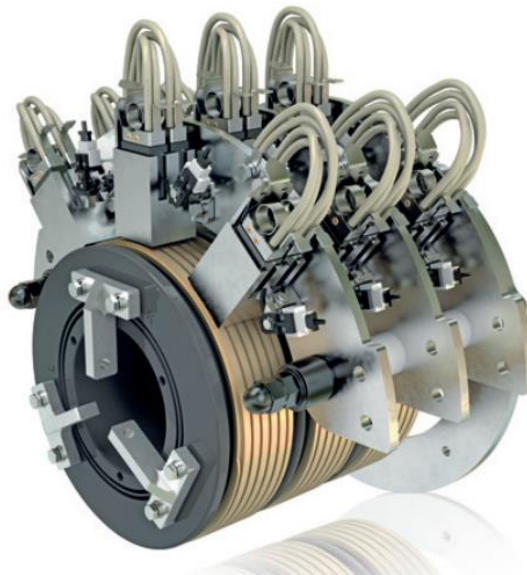


Figure 19. Bagues collectrices ABB[21]

Les bagues collectrices du rotor sont responsables de la transmission de différents signaux et de la puissance, notamment :

1. Signaux de génération d'énergie : Elles transmettent la puissance électrique générée par le générateur de l'éolienne, permettant ainsi son transfert vers la partie fixe pour une distribution ultérieure vers le réseau électrique.
2. Signaux de contrôle : Elles transmettent les signaux de contrôle provenant des capteurs et des systèmes de surveillance situés sur le rotor, tels que les capteurs de vitesse du vent, les systèmes de contrôle de l'incidence des pales et les systèmes de surveillance de

l'état des pales. Ces signaux sont essentiels pour ajuster les performances de l'éolienne et optimiser son fonctionnement.

3. Signaux de communication : Dans certains cas, les bagues collectrices peuvent également être utilisées pour transmettre des signaux de communication, permettant ainsi l'échange de données entre le rotor et la nacelle à des fins de surveillance, de contrôle et de diagnostic.

Il est important de noter que les bagues collectrices nécessitent une inspection et une maintenance régulières pour assurer leur bon fonctionnement. Au fil du temps, les balais peuvent s'user, ce qui entraîne une augmentation de la résistance et une éventuelle dégradation du signal. Une maintenance régulière et un remplacement des balais en temps opportun sont nécessaires pour éviter les interruptions dans la transmission électrique et garantir le bon fonctionnement de l'éolienne.

2.6 Le système du contrôle :

Le système de contrôle d'une éolienne avec une machine asynchrone doublement alimentée est responsable de la supervision et de la régulation du fonctionnement de la machine pour maximiser l'efficacité de la production d'énergie éolienne. Voici les principaux éléments du système de contrôle :

1. Contrôle du générateur : Le contrôle du générateur permet de réguler la production d'électricité en fonction des conditions du vent. Cela inclut le contrôle de la vitesse de rotation du rotor, qui peut être ajustée pour optimiser l'efficacité énergétique et maintenir la machine dans des plages de fonctionnement sûres.

2. Contrôle du convertisseur : La machine asynchrone doublement alimentée utilise un convertisseur électronique de puissance pour alimenter l'enroulement auxiliaire du rotor. Le contrôle du convertisseur est essentiel pour maintenir la synchronisation entre le stator et le rotor, ainsi que pour ajuster la quantité de puissance active et réactive échangée avec le réseau électrique.

3. Contrôle de la puissance réactive : La machine asynchrone doublement alimentée peut être utilisée pour fournir de la puissance réactive au réseau électrique, ce qui contribue à la stabilité du réseau. Le système de contrôle peut réguler la quantité de puissance réactive fournie en fonction des besoins du réseau et des conditions de charge.

4. Surveillance et diagnostic : Le système de contrôle peut inclure des fonctionnalités de surveillance et de diagnostic pour détecter les éventuels problèmes ou défaillances dans la machine. Cela permet de prendre des mesures correctives rapidement et de minimiser les temps d'arrêt non planifiés.

5. Communication et interface : Le système de contrôle peut également comprendre des fonctionnalités de communication pour échanger des données avec des systèmes de surveillance centralisés ou d'autres éoliennes du parc éolien. Cela facilite la supervision à distance, la coordination des opérations et l'intégration dans le réseau électrique.

3 Modélisation de l'éolienne :

La Figure 20 représente le schéma de l'éolienne qui est basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) connectée au réseau. Ce schéma inclut les différentes variables mécaniques et électriques nécessaires à la modélisation de la conversion électromécanique. Dans un premier temps, nous décrivons le modèle aérodynamique de la turbine, suivi du modèle mécanique de l'éolienne. Ensuite, nous expliquons comment l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique. Nous donnons ensuite une brève description du fonctionnement de la MADA, puis nous la modélisons dans le repère de Park afin de présenter la commande du convertisseur de courant de machine (CCM). Enfin, nous modélisons également la connexion du convertisseur de courant de réseau (CCR) au réseau électrique via le filtre RL dans le repère de Park, dans le but de présenter la commande du CCR[13].

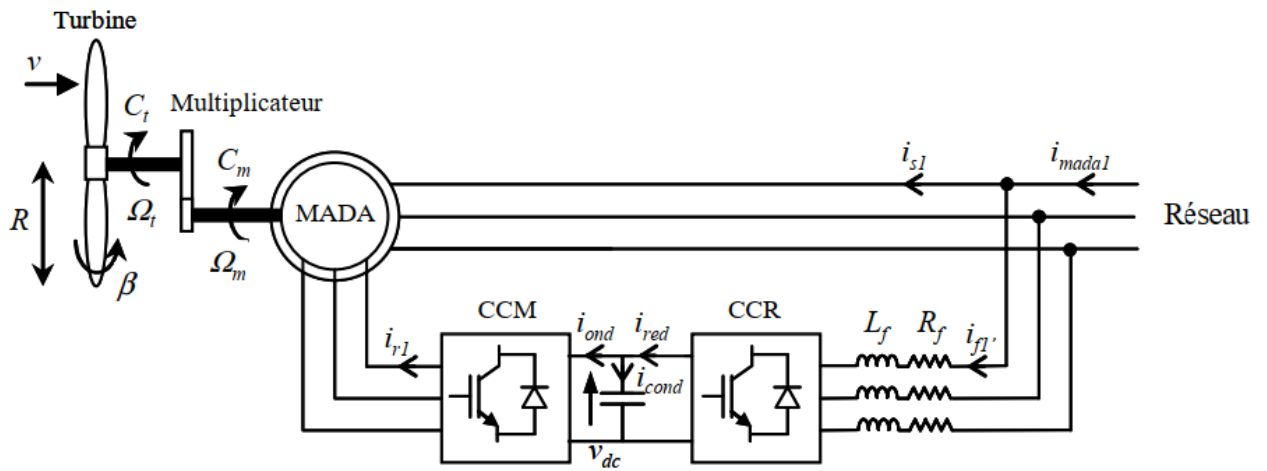


Figure 20. Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau[13]

3.1 La turbine d'éolienne :

L'électricité est produite par les éoliennes par le fait de la conversion de force du vent en une énergie électrique.

Le vent de vitesse v , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, notée P_m , s'exprimant par [Heier, 1998] [13]:

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

Où λ est défini par :

$$\lambda = \frac{\omega r}{v} \quad (2)$$

Avec :

- λ : la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent,
- ρ : la masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C),
- S : la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle décrit étant défini par la longueur d'une pale,
- ω : La vitesse de rotation de la turbine,
- r : le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale

3.2 Modélisation du MADA :

La MADA peut être considérée comme une génératrice asynchrone traditionnelle avec une tension de rotor non nulle. L'équation dynamique d'une MADA triphasée peut être écrite dans un référentiel direct-quadratique (d-q) tournant synchrone comme suit [22] :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} \quad (3, a)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} \quad (3, b)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s\omega_s \Psi_{qr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} \quad (4, a)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + s\omega_s \Psi_{dr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} \quad (4, b)$$

Les flux statoriques et rotoriques, s'expriment par [22]:

$$\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (5, a)$$

$$\Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (5, b)$$

$$\Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (6, a)$$

$$\Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (6, b)$$

Avec :

- v_{ds} et v_{qs} : les tensions statoriques dans le repère (d-q),
- v_{dr} et v_{qr} : les tensions rotoriques dans le repère (d-q),
- i_{ds} et i_{qs} : les courants statoriques dans le repère (d-q),
- i_{dr} et i_{qr} : les courants rotoriques dans le repère (d-q),
- L_r et L_s : les inductances rotoriques et statoriques dans le repère (d-q), et L_m est l'inductance magnétisante[13],
- Ψ_{ds} et Ψ_{qs} : les flux statoriques dans le repère (d-q),
- Ψ_{dr} et Ψ_{qr} : les flux rotoriques dans le repère (d-q),
- R_s et R_r : les résistances respectives des bobinages statorique et rotorique,
- ω_s : c'est la vitesse de rotation du référentiel synchrone,

- $s\omega_s = (\omega_s - \omega_e)$ est la fréquence du glissement, s est le glissement ω_e c'est la vitesse électrique de la génératrice qui est définie en fonction de la vitesse mécanique de la génératrice et le nombre de pôles $\omega_e = \frac{P}{2}\omega_r$, avec ω_r est la vitesse angulaire du rotor.

Le couple électrique noté C_e est exprimé par[22] :

$$C_e = \frac{3}{2}P(\Psi_{dr}i_{qs} - \Psi_{qr}i_{ds}) = \frac{3}{2}PL_m(i_{dr}i_{qs} - i_{qr}i_{ds}) \quad (7)$$

Avec P est le nombre de pôles

Les puissances actives et réactives sont données par[22]:

$$P_s = \frac{3}{2}(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) \quad (8)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(v_{ds}i_{qs} - v_{qs}i_{ds}) \quad (9)$$

$$P_r = \frac{3}{2}(v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr}) \quad (10)$$

$$Q_r = \frac{3}{2}(v_{dr}i_{qr} - v_{qr}i_{dr}) \quad (11)$$

4 Commande d'une éolienne avec MADA :

La stratégie de contrôle d'une éolienne à génératrice asynchrone doublement alimentée (DFIG) comprend différents éléments et techniques pour assurer un fonctionnement efficace et stable. De la commande MPPT qui assure l'obtention du maximum d'énergie par le vent en ajustant la position des pales et la direction de la turbine,

Au contrôle coté rotor qui vise à réguler les courants du rotor, assurant un fonctionnement fluide et permettant un contrôle de la vitesse variable et permettant à la MADA de fonctionner avec une efficacité optimale sur une large plage de vitesses de vent,

Ainsi la commande côté réseau en contrôlant le flux de puissance entre le stator et le réseau pour réguler la tension et la fréquence de la puissance injectée dans le réseau.

4.1 Stratégie de commande MPPT :

La variation maximale de puissance avec la vitesse de rotation ω de la MADA est prédéfinie pour chaque éolienne. Ainsi, pour le MPPT, le système de contrôle doit suivre la courbe caractéristique de suivi (TCC) de l'éolienne [23]. Chaque éolienne a sa TCC spécifique. La vitesse réelle de l'éolienne, ω , est mesurée et la puissance mécanique correspondante de la TCC est utilisée comme puissance de référence pour la boucle de contrôle de puissance [23].

L'éolienne comprend quatre zones de contrôle, la vitesse de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent est illustrée dans la Figure 4. Ces zones de fonctionnement peuvent être exprimées comme suit [24]:

- Zone 1 : Dans cette région, la vitesse est très faible car l'éolienne ne peut pas générer de puissance.
- Zone 2 : Cette zone de contrôle permet de restaurer la puissance maximale limitée par la vitesse du vent minimale à la valeur nominale.
- Zone 3 : Dans cette région, l'éolienne fonctionne à sa vitesse maximale nominale. Cependant, la production de puissance n'est pas maximale.
- Zone 4 : Dans cette zone, l'éolienne génère la puissance nominale maximale. Au-delà de la vitesse du vent maximale autorisée, les dispositifs de protection s'activent pour éviter toute défaillance ou dommage de l'éolienne.

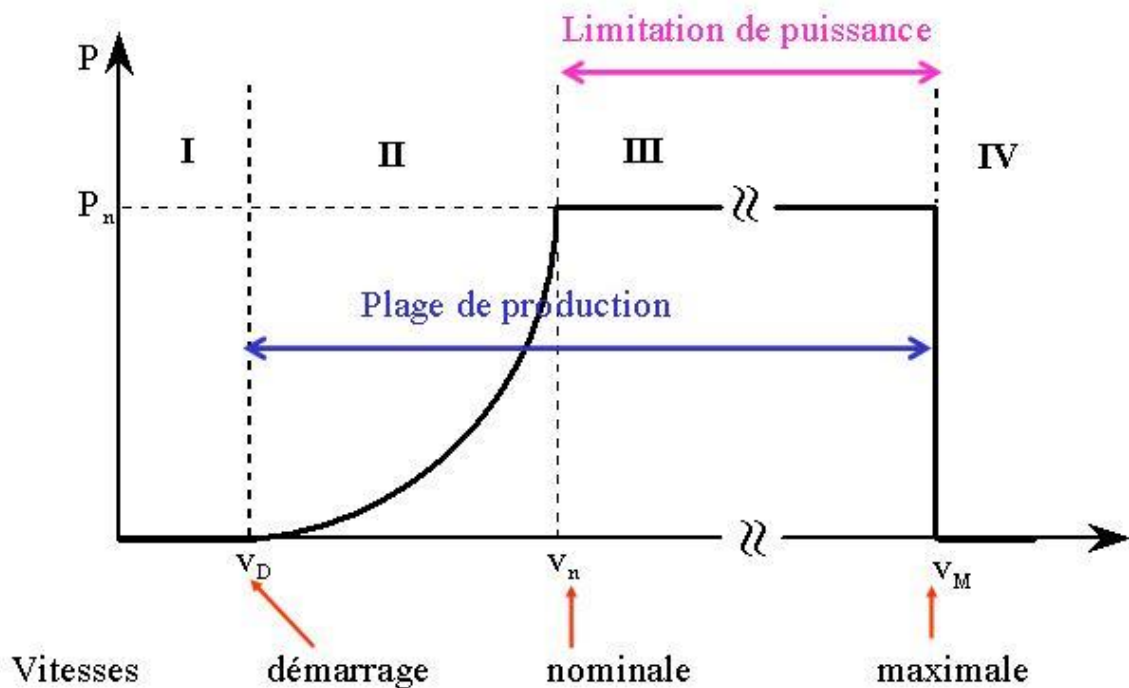


Figure 21. Plages d'exploitation d'une turbine éolienne (axe horizontal) en fonction de la vitesse du vent [25]

4.2 Commande coté machine d'une MADA :

Le générateur asynchrone à double alimentation permet de fournir une sortie de puissance à l'enroulement du stator ainsi qu'à l'enroulement du rotor d'une machine asynchrone à rotor bobiné[22]. Grâce à un tel générateur, il est possible d'obtenir un bon facteur de puissance même lorsque la vitesse de la machine est assez différente de la vitesse synchrone. Ces machines peuvent donc fonctionner sans avoir besoin d'une compensation d'excitation excessive[22].

Les courants rotoriques i_{abc_r} de la machine peuvent être décomposés en composantes (d-q) : i_{dr} et i_{qr} . La composante i_{dr} produit un flux dans la lacune d'air, aligné avec le vecteur de

flux rotatif liant le stator, tandis que la composante i_{qr} produit un flux perpendiculaire à ce vecteur. Le couple dans la machine est le produit vectoriel de ces deux vecteurs, et donc seule la composante i_{qr} contribue au couple de la machine et donc à la puissance. La composante i_{dr} contrôle alors la puissance réactive entrant dans la machine. Le contrôle précis des courants i_{dr} et i_{qr} permet le contrôle des puissances active et réactive côté stator[22].

L'étape importante consiste à obtenir la position instantanée du vecteur de flux rotatif dans l'espace afin d'obtenir le référentiel tournant. Cela peut être réalisé en se rendant compte que, en vertu de la loi de Lenz de l'électromagnétisme, la tension du stator est simplement la dérivée du flux d'enroulement du stator.

Les tensions et les courants triphasés du stator sont convertis en composantes $(\alpha-\beta)$ $v_\alpha, v_\beta, i_\alpha$ et i_β . Le flux du stator dans le référentiel stationnaire $(\alpha-\beta)$ est donné par :

$$\Psi_{\alpha\beta s} = \int v_{\alpha\beta s} - R_s i_{\alpha\beta s} dt = (\Psi_{\alpha s}, \Psi_{\beta s}) \quad (12)$$

Afin d'aligner le référentiel (d-q) tournant de manière synchrone avec le flux du stator, des informations sur l'angle du flux du stator peuvent être extraites en utilisant les expressions suivantes :

$$\Psi_s = |\Psi_{\alpha\beta s}| \angle(\Psi_{\alpha\beta s}) \quad (13)$$

$$\angle(\Psi_{\alpha\beta s}) = \theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\Psi_{\alpha s}}{\Psi_{\beta s}} \right); |\Psi_{\alpha\beta s}| = \sqrt{(\Psi_{\alpha s}^2 + \Psi_{\beta s}^2)} \quad (14)$$

L'angle θ_s donne l'emplacement instantané du champ magnétique rotatif du stator. Le rotor lui-même tourne et se trouve instantanément à l'angle θ_r . Ainsi, avec un référentiel attaché au rotor, le vecteur du champ magnétique du stator se trouve à l'emplacement $\theta_s - \theta_r$, ce qui est appelé "angle de glissement". À partir des équations (3.a) - (3.b), l'alignement du référentiel conduit à un modèle simplifié :

$$v_{qs} = \omega_s \Psi_{ds} = v_s; v_{ds} = 0 \quad (15)$$

On peut observer que le couple électromagnétique dépend du courant i_{qr} et peut être contrôlé par la composante de tension v'_{qr} . De plus, le courant magnétisant rotorique i_{dr} peut être contrôlé par la composante de tension v'_{dr} .

Le contrôleur est illustré dans la Figure 22, où les erreurs entre les courants i_{dr} et i_{qr} et les courants de référence i_{dr-ref} et i_{qr-ref} sont appliquées aux régulateurs PI pour obtenir les tensions v'_{dr} et v'_{qr} respectivement. La sortie du contrôleur doit être compensée avec deux termes de découplage afin d'obtenir les tensions de référence appropriées v_{dr-ref} et v_{qr-ref} comme suit :

$$v_{dr-ref} = R_r i_{dr} + \frac{\sigma L_r di_{dr}}{dt} - \omega_{glissement} \sigma L_r i_{qr} \quad (16)$$

$$v_{qr-ref} = R_r i_{qr} + \frac{\sigma L_r di_{qr}}{dt} + \omega_{glissement} \left(\frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds} + \sigma L_r i_{dr} \right) \quad (17)$$

$$\text{Avec : } \Psi_{ds} = \Psi_s = L_M I_{ms}; I_{ms} = \frac{\Psi_{ds}}{L_M}; \Psi_{dr} = \frac{L_M^2 I_{ms}}{L_s} + \sigma L_r i_{dr}; \Psi_{qr} = \sigma L_r i_{qr};$$

$$\omega_{\text{glissement}} = \omega_s - \omega_r; \sigma = 1 - L_M^2 / L_s L_r$$

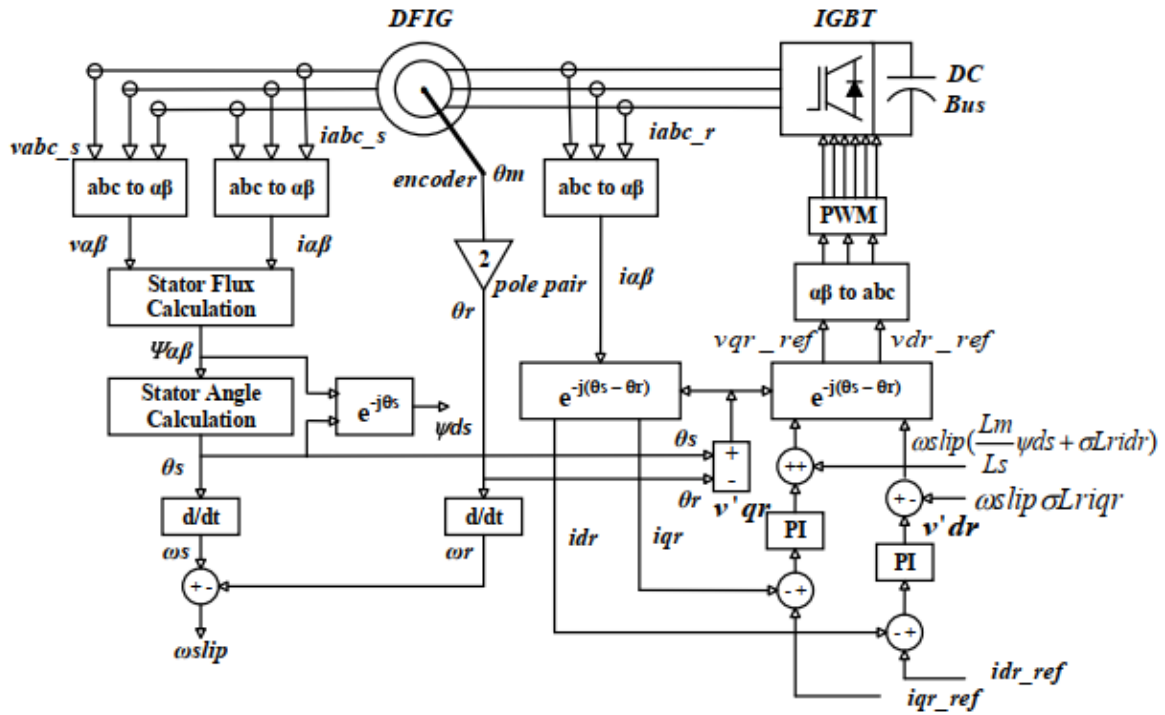


Figure 22. Commande coté machine

Dans cette approche de contrôle, les deux courants rotoriques $\dot{i}_{dr}$ et $\dot{i}_{qr}$ doivent être contrôlés afin de suivre leurs références respectives, i_{dr-ref} et i_{qr-ref} . En tenant compte de l'alignement du référentiel avec le flux du stator, le courant q contrôle la puissance active de la machine tandis que le courant d contrôle sa puissance réactive. Ainsi, le courant q peut être lié au couple électrique de la machine et le courant d peut être lié à la valeur de tension au point de raccordement commun comme indiqué par :

$$i_{dr-ref} = \frac{v_{qs}}{\omega_s L_M} \quad (18)$$

$$\dot{i}_{qr-ref} = -2T_e L_s / (3PL_M^2 i_d^*) \quad (19)$$

4.3 Commande coté réseau de la MADA :

L'objectif principal du contrôleur côté réseau est de maintenir une tension de liaison continue (DC-link) constante, indépendamment de la valeur et de la direction du flux de puissance du rotor[22]. Pour atteindre cet objectif, une stratégie de contrôle de courant à hystérésis avec un référentiel aligné sur la position de la tension du stator est utilisée, comme illustré dans la

Figure 23. Cela permet un contrôle indépendant de la tension de liaison DC et de la puissance réactive entre le convertisseur et le réseau.

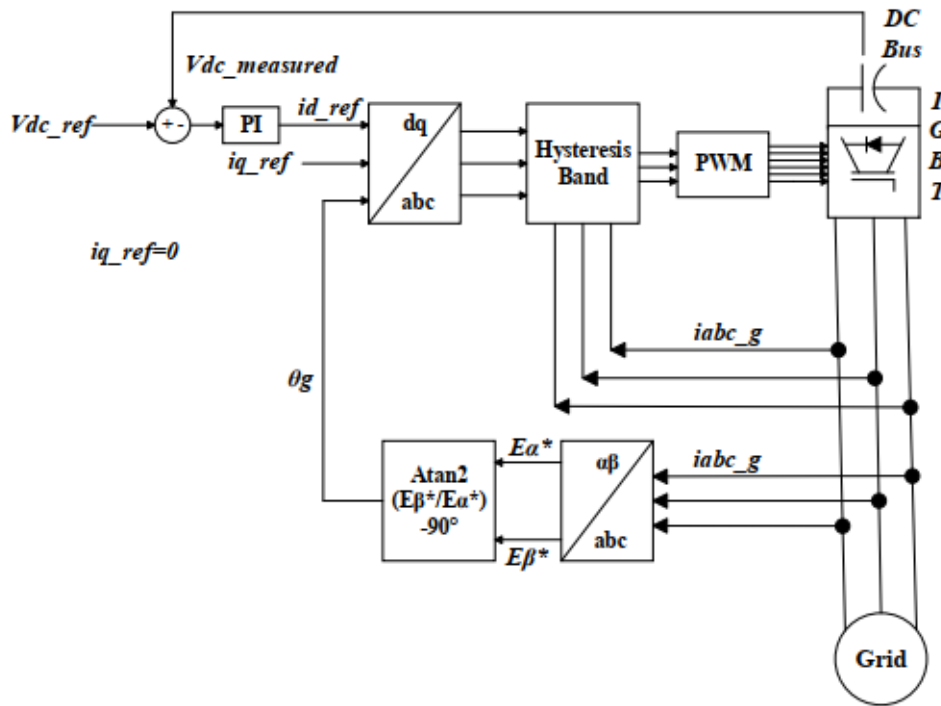


Figure 23. Commande coté réseau

Le convertisseur côté rotor nécessite une alimentation électrique en courant continu (DC). La tension continue (DC) est généralement générée à l'aide d'un autre convertisseur de source de tension connecté au réseau alternatif aux bornes du stator du générateur. Un condensateur en courant continu (DC) est utilisé pour éliminer les fluctuations et maintenir la tension du lien DC relativement stable. Ce convertisseur PWM réseau est exploité pour maintenir la tension du lien DC à une valeur constante. En effet, cela signifie que le convertisseur côté réseau fournit les besoins en puissance réelle du convertisseur côté rotor. Il est possible de faire fonctionner ce convertisseur en utilisant une approche de référence de courant. Par conséquent, un contrôleur d'hystérésis est utilisé dans lequel l'erreur entre les courants souhaités et réels est transmise à un contrôleur, qui contrôle la tension de sortie d'un convertisseur PWM sinusoïdal conventionnel et assure le facteur de puissance requis [26]. Le diagramme de contrôle du convertisseur côté réseau est illustré dans la Figure 23. L'erreur de tension du lien DC est donnée par :

$$e = v_{dc-ref} - v_{dc} \quad (20)$$

La variation est donc donnée par :

$$\Delta_e = (1 - z^{-1}) \quad (21)$$

Les composants de voltage dans le référentiel (d-q) au côté réseau sont donnés par :

$$v_d = Ri_d + L \left(\frac{di_d}{dt} \right) - L\omega i_q + v_{dl} \quad (22)$$

$$v_q = Ri_q + L \left(\frac{di_q}{dt} \right) - L\omega i_d + v_{ql} \quad (23)$$

Etant donné que v_d , v_q sont les composantes (d-q) de la tension du réseau, v_{dl} , v_{ql} sont les composantes (d-q) de la tension de l'onduleur du réseau, i_d , i_q sont les composantes (d-q) du courant du réseau ; L et R sont l'inductance et la résistance du filtre ; et ω est la fréquence angulaire du réseau.

Les flux de puissance active et réactive sont alors :

$$P = 3(v_d i_d + v_q i_q) \quad (24)$$

$$Q = 3(v_d i_q - v_q i_d) \quad (25)$$

La détection de la position angulaire de référence de la tension du réseau est calculée comme suit :

$$\Theta_e = \int \omega_e dt = \tan^{-1} \left(\frac{v_\beta}{v_\alpha} \right) \quad (26)$$

Où v_α et v_β sont les composantes (α - β) de la tension du réseau. L'alignement avec la composante d de la tension v_d conduit à $v_q = 0$. De plus, puisque la tension du réseau a une amplitude constante, v_d a également une amplitude constante.

La puissance active, pour l'équilibrage au niveau du DC-link, peut être exprimée par (en négligeant les harmoniques) :

$$v_{dc} i_{os} = 3v_d i_d \quad (27)$$

La tension du DC-link v_d est contrôlée par le courant i_d dans le référentiel orienté vers le vecteur de tension. Ainsi, un courant de référence i_{d-ref} est déduit de l'erreur de tension du DC-link Δe et de la variation de l'erreur e en réglant un régulateur PI, comme indiqué dans la Figure 23. Pour garantir un facteur de puissance unitaire au niveau du convertisseur côté réseau, la puissance réactive doit être nulle, donc $i_{q-ref} = 0$. Après une transformation dq-abc de ces courants de référence, une modulation par hystérésis peut ensuite être mise en œuvre.

5 Conclusion :

La turbine éolienne avec une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une conception couramment utilisée, elle est souvent utilisée dans des régions où les conditions éoliennes sont variables, car leur conception permet un fonctionnement à vitesse variable et une meilleure adaptation aux variations du vent. Ces turbines sont appréciées pour leur efficacité énergétique, leur contrôle de puissance amélioré et leur capacité à être intégrées au réseau électrique de manière stable.

. La turbine se compose d'un rotor avec des enroulements triphasés, qui sont connectés au réseau via des convertisseurs de puissance. Les enroulements du stator sont directement connectés au réseau, tandis que les enroulements du rotor sont connectés via des bagues collectrices

et de l'électronique de puissance. Cette configuration permet un fonctionnement à vitesse variable et un contrôle amélioré de la production d'énergie. Le système de contrôle régule le courant et la tension du rotor, optimisant l'extraction de puissance du vent.

La modélisation des turbines DFIG consiste à analyser l'aérodynamique, les composants mécaniques, les systèmes électriques et les algorithmes de contrôle pour simuler avec précision leurs performances et évaluer des facteurs tels que la production d'énergie, l'intégration au réseau et la stabilité.

Chapitre 3

Modélisation Matlab/Simulink d'une Eolienne basée sur la MADA

CHAPITRE 3 : MODELISATION MATLAB D'UNE EOLIENNE BASEE SUR UNE MADA

1 Introduction :

Avec une bonne compréhension de son modèle mathématique, il est possible de modéliser le système éolien avec une machine asynchrone doublement alimentée MADA, ainsi que sa simulation dans l'environnement **MATLAB/Simulink**.

La simulation des systèmes est un outil pour étudier le comportement d'un système réel dans un environnement virtuel, elle permet d'étudier le fonctionnement, l'interaction et les performances d'un système dans des différentes conditions sans avoir à le mettre en œuvre physiquement. Les objectifs de la simulation des systèmes peuvent inclure :

- Compréhension du système : La simulation permet de mieux comprendre le comportement et les caractéristiques d'un système, en analysant ses réponses dans des scénarios variés.
- Conception et optimisation : Les simulations aident à concevoir et à optimiser des systèmes avant leur mise en production ou leur déploiement. Elles permettent d'évaluer différentes configurations, paramètres et stratégies pour trouver la meilleure solution.
- Évaluation des performances : La simulation permet d'évaluer les performances d'un système dans des conditions réalistes, en mesurant des indicateurs tels que l'efficacité, la fiabilité, la robustesse, la consommation d'énergie, etc.
- Détection d'erreurs et de problèmes : La simulation permet de détecter et d'analyser les erreurs, les défauts ou les problèmes potentiels d'un système, ce qui facilite leur correction et améliore la qualité du système final.
- Formation et apprentissage : La simulation est utilisée dans le cadre de la formation et de l'apprentissage pour permettre aux utilisateurs d'acquérir des compétences et de se familiariser avec le fonctionnement des systèmes complexes, sans risquer de dommages ou de perturbations.

MATLAB/Simulink :

Matlab/Simulink est une plateforme logicielle développée par MathWorks qui combine des outils de calcul numérique, d'analyse de données et de simulation. Elle est largement utilisée dans divers domaines tels que l'ingénierie, la science, les mathématiques et la finance.

Matlab est un langage de programmation et un environnement qui offre un ensemble puissant d'outils pour le calcul numérique, la visualisation des données et le développement d'algorithmes. Il propose une large gamme de fonctions et de bibliothèques intégrées pour les

opérations mathématiques, l'analyse statistique, le traitement du signal, l'optimisation, etc. Matlab permet aux utilisateurs d'écrire des scripts et des fonctions pour résoudre des problèmes mathématiques complexes, manipuler des données et créer des visualisations.

Simulink, quant à lui, est une extension de Matlab qui fournit un environnement graphique pour la modélisation, la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques. Il permet aux utilisateurs de construire des diagrammes à l'aide de blocs prédéfinis qui représentent les composants du système, tels que les opérations mathématiques, les contrôleurs, les capteurs, les actionneurs, etc. En connectant ces blocs les uns aux autres, les utilisateurs peuvent créer des modèles de système complexes et simuler leur comportement au fil du temps. Simulink propose une gamme de solveurs de simulation pour résoudre les équations différentielles qui décrivent la dynamique du système.

Matlab/Simulink est largement utilisé dans l'industrie et dans le milieu universitaire pour diverses applications telles que la conception de systèmes de contrôle, le traitement du signal, le traitement d'images, la robotique, les systèmes électriques, les systèmes de communication, etc. Il offre une interface conviviale pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes, ce qui en fait un outil puissant pour l'analyse, la conception et l'optimisation des systèmes.

2 Modélisation des composants de système :

La modélisation de l'éolienne qu'on a faite dans le chapitre précédent peut être effectuée dans l'environnement MATLAB/Simulink, la figure suivante nous donne un aperçu général de modèle.

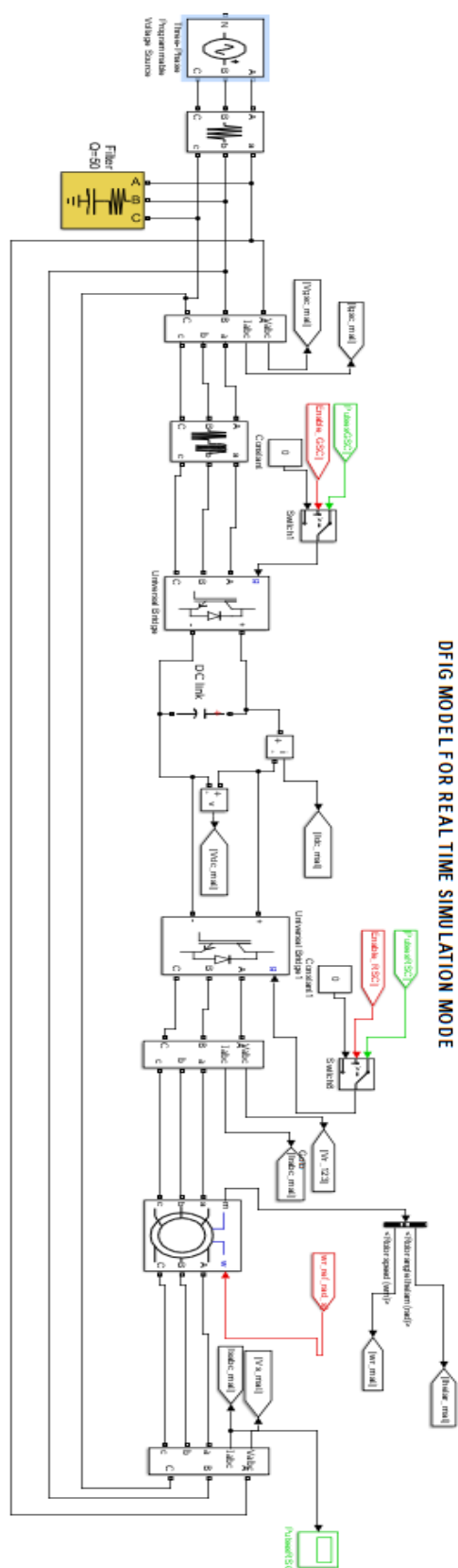


Figure 24. Vue d'ensemble du modèle éolienne basée sur MADA dans Simulink

2.1 La génératrice :

La génératrice doublement alimentée est modélisée dans Simulink à travers un bloc montré dans la figure suivante, ce bloc est disponible dans la bibliothèque Simulink et il suffit d'introduire les paramètres de la génératrice pour la simulation.

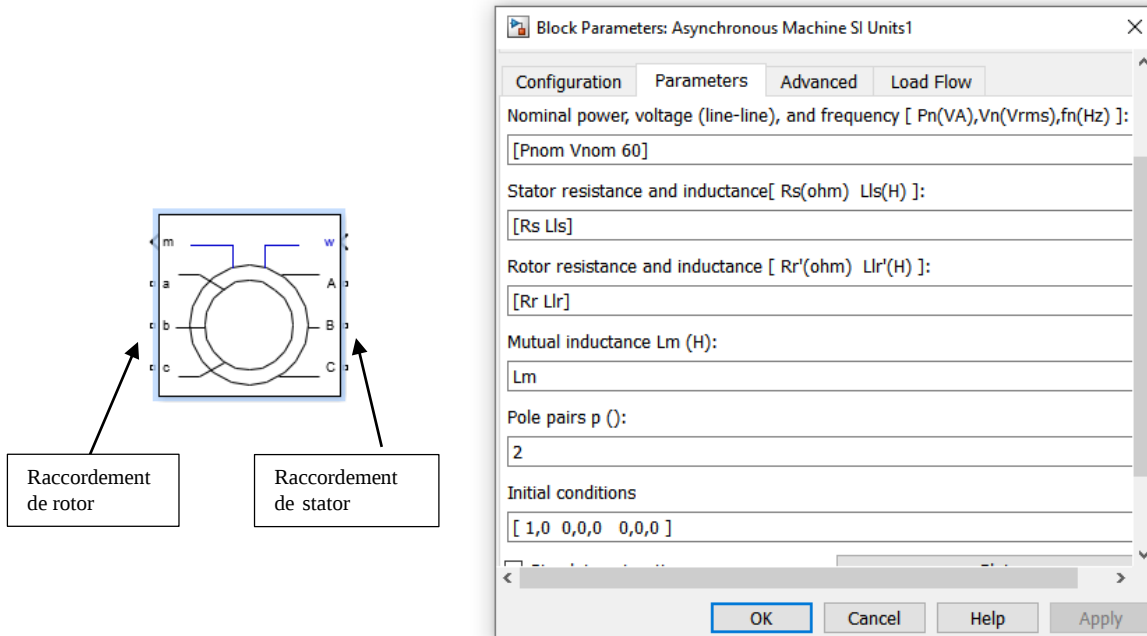


Figure 25. Modèle Simulink d'une génératrice MADA et ses paramètres

Le bloc de la génératrice peut être raccordé donc par le stator et le rotor par les 3 phases (A,B,C) et (a,b,c) respectivement ce qui permettra d'émuler une machine asynchrone à double alimentation, Les paramètres de la génératrice sont introduit dans un script MATLAB comme suite :

```
Ts=50e-6;
Rs = 1;
Rr = 0.68;
Lm = 63e-3;
Lls = 3.2e-3;
Llr = 3.2e-3;
LM=1.5*Lm;
Ls=Lls+LM;
Lr=Llr+LM;
L=LM^2/Ls;
sigma=1-LM^2/(Ls*Lr);
pp=2;
Pnom=2000;
```

2.2 Les convertisseurs et le DC-link :

Dans une machine asynchrone à double alimentation (DFIG), Les convertisseurs permettent de contrôler et de réguler le flux d'énergie entre le rotor de la machine asynchrone et le réseau électrique. Ils assurent une adaptation efficace de la puissance éolienne captée par le rotor avec les exigences du réseau, tout en permettant un fonctionnement stable et une optimisation de la production d'énergie.

Le bus DC est une interface commune entre le CCM et le GCR. Il fournit une tension constante pour alimenter les convertisseurs et permet d'équilibrer le flux d'énergie entre le rotor et le réseau. Le bus DC est généralement équipé d'un système de régulation de tension pour maintenir une tension constante, garantissant ainsi un fonctionnement stable des convertisseurs.

A travers la bibliothèque Simulink on peut modéliser l'ensemble Convertisseurs DC-link de notre système comme il est montré dans la figure suivante :

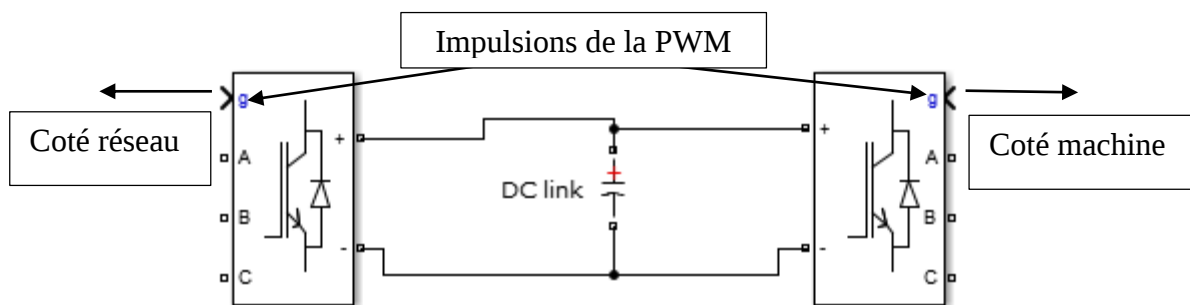


Figure 26. Modèle Simulink du DC-link et les CCM/CCR

2.3 Les capteurs tension courant :

Les algorithmes de commande de ce système éolien sont définis grâce à les capteurs tension et courant qui envoient les valeurs mesurées aux contrôleurs pour que les différents types de régulation puissent s'opérer effectivement, Les capteurs des signaux triphasés sont utilisés pour le rotor, stator et réseau et le circuit monophasé dans le DC-link et mesuré par des capteurs tension et courant à une seule phase.

Les modèles de ces capteurs sont obtenus de la bibliothèque Simulink, la figure suivante montre les capteurs utilisés dans le système

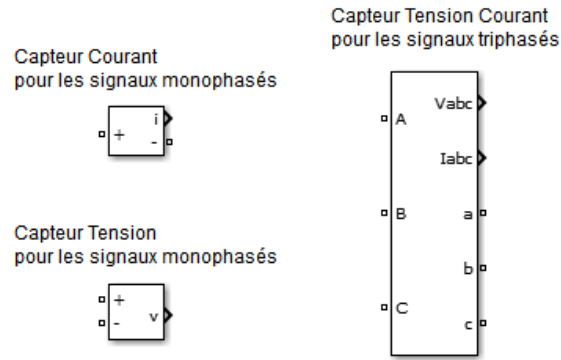


Figure 27. Types de capteurs utilisés dans la modélisation

3 Modélisation des dispositifs de commande :

Les deux approches de commande présents dans le modèle de simulation sont la commande coté rotor et ma commande coté réseau, la commande coté rotor c'est le contrôle des courant rotoriques dans le référentiel (d-q) i_d et i_q pour qu'ils suivent leurs références i_{dref} et i_{qref} , Alors que la commande coté réseau sert à contrôler le voltage v_{dc} de DC-link en le régulant à suivre une référence donnée.

3.1 Le convertisseur PWM :

Un convertisseur PWM (Modulation de Largeur d'Impulsion) dans une éolienne à double alimentation avec une génératrice asynchrone (MADA) est responsable de contrôler le flux de puissance entre le côté rotor et le côté réseau de la génératrice. Il convertie la puissance électrique d'une forme à une autre en ajustant la largeur d'impulsion des signaux de commutation, il est généralement composé de commutateurs électroniques de puissance, tels que des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT), qui sont contrôlés par un signal de commutation à haute fréquence. En ajustant le rapport cyclique du signal de commutation, le convertisseur peut réguler la tension de sortie ou le courant.

- Le convertisseur PWM du côté rotor est utilisé pour contrôler le flux de puissance entre le rotor et le réseau AC du côté rotor. Il permet un fonctionnement à vitesse variable de l'éolienne et permet le contrôle de la puissance active et réactive échangée avec le réseau.
- Le convertisseur PWM du côté réseau de l'éolienne MADA est responsable de régulation de flux de puissance entre le stator et le réseau. Il ajuste la tension et la fréquence de l'énergie AC du côté réseau pour maintenir une opération stable du réseau et répondre aux exigences du réseau électrique.



Figure 28. Les modèles de PWM dans Simulink

L'entrée de convertisseur PWM coté machine reçoit la tension rotorique triphasé après la conversion (dq-abc) des tensions v_{dr-ref} et v_{qr-ref} , il va ensuite envoyer des pulsation pour commander le convertisseur coté machine.

Le contrôleur d'hystérésis est utilisé dans lequel l'erreur entre les courants désirés et réels est transmise à travers un contrôleur, qui contrôle la tension de sortie d'un convertisseur PWM sinusoïdal conventionnel et garantit le facteur de puissance requis, les deux entrées de PWM coté réseau sont le courant obtenu de la conversion (dq-abc) et le courant actuel de réseau, la sortie c'est les pulsations envoyées au convertisseur.

3.2 Modélisation Simulink de la commande coté machine :

Le bloc de commande coté machine reçoit les entrées qui sont des mesures données par les capteurs de modèle de l'éolienne, et aussi les valeurs de référence définies par l'utilisateur dans l'interface d'utilisateur.

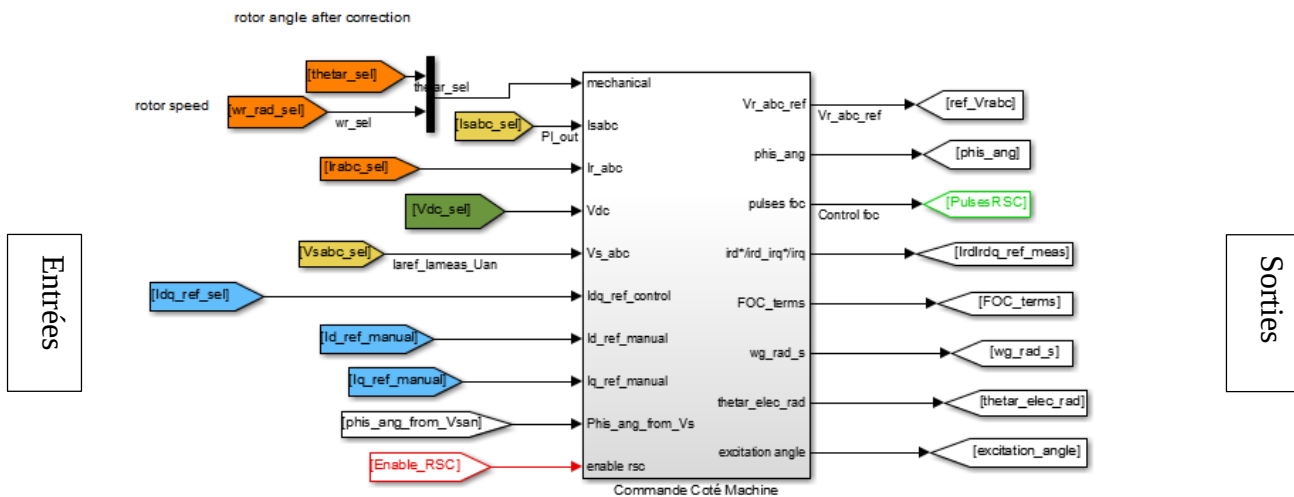


Figure 29 Modèle Simulink de commande coté machine

On trouve 2 étapes dans la commande coté machine.

- 1) L'étape de la conversion des grandeurs tel que le courant rotorique triphasé en 2 grandeurs i_d , i_q dans le référentiel (d-q) à travers les deux angles θ_r et θ_s ce qui nous permettra de réaliser la boucle de régulation de ces courants.
- 2) L'étape de commande vectoriel en recevant les grandeurs converties en 1ère étape et réalisant une régulation PI des courants i_d , i_q

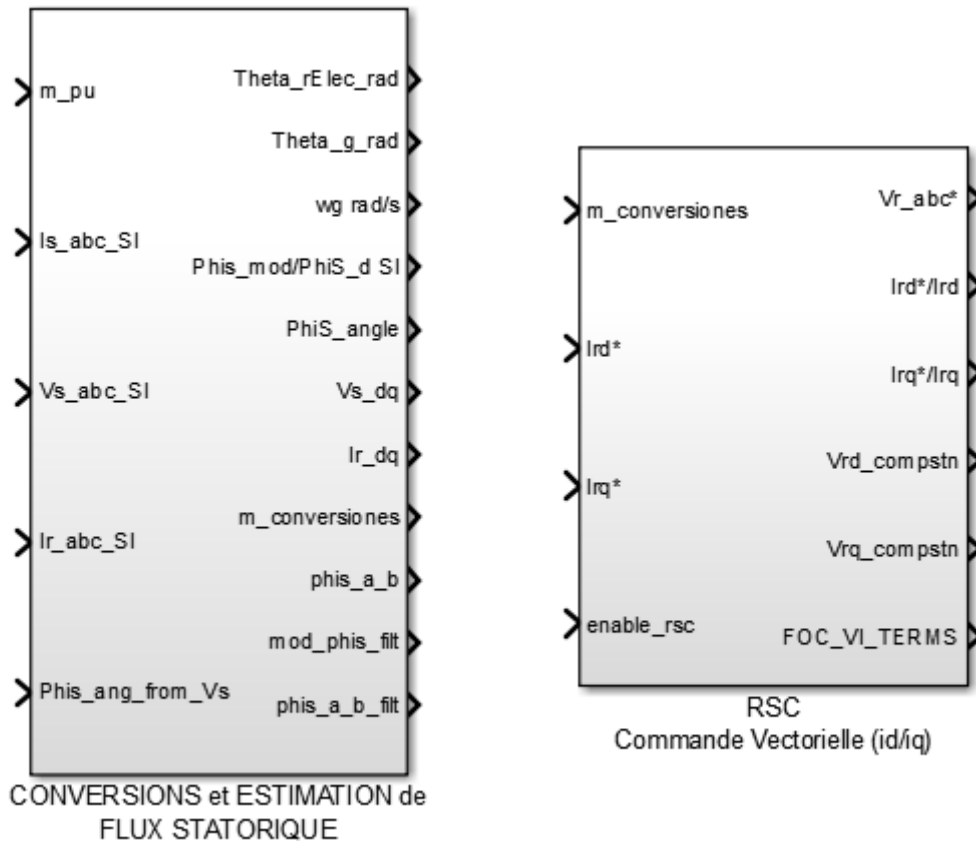


Figure 30. Conversion et commande coté machine

3.3 Modélisation de la commande coté réseau :

L'objectif dans cette commande c'est de maintenir la valeur de voltage DC-link à la référence donnée en utilisant la régulation PI. Le régulateur PI recevra des signaux d'entrée représentant l'erreur entre les valeurs de voltage souhaités et réels, et leurs sorties seront connectées au bloc de Source de Tension Contrôlée.

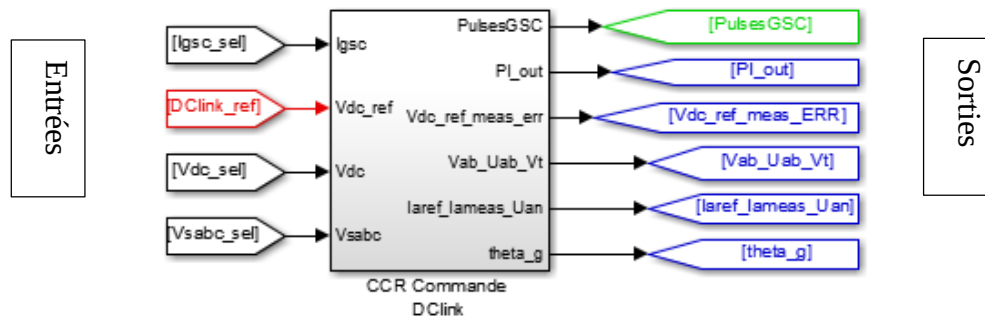


Figure 31. Le modèle Simulink de contrôleur coté réseau

4 Simulation de modèle :

L'utilisation de la simulation MATLAB Simulink pour modéliser une éolienne à double alimentation à induction MADA offre de nombreux avantages pour l'étude et l'analyse de ce système. La simulation permet de reproduire fidèlement le comportement de la MADA, en prenant en compte les interactions entre les différents composants tels que le générateur, les convertisseurs et le réseau électrique.

Grâce à MATLAB Simulink, il est possible de créer un modèle complet de la MADA en utilisant des blocs fonctionnels représentant les différents éléments du système. Les blocs peuvent être interconnectés pour représenter les liaisons électriques et les signaux de contrôle. Il est également possible de définir les caractéristiques des composants, telles que les paramètres du générateur, les convertisseurs, les contrôleurs et les conditions du réseau électrique.

Il est possible d'analyser le comportement de la DFIG dans différentes conditions de fonctionnement, telles que des variations de vitesse du vent, des déséquilibres de charge ou des défauts du réseau. Cela permet d'évaluer les performances de la MADA, d'optimiser les stratégies de contrôle et de diagnostiquer d'éventuels problèmes.

En résumé, l'utilisation de la simulation MATLAB Simulink pour modéliser une éolienne à double alimentation à induction permet une analyse approfondie du système, une optimisation des stratégies de contrôle et une évaluation des performances dans différentes conditions de fonctionnement. C'est un outil précieux pour la conception, l'analyse et l'amélioration des éoliennes MADA.

4.1 La commande des courant Id/Iq :

Dans cette partie on va illustrer à partir des figures les résultats de simulation de la commande vectorielle de courant dans le contrôleur coté machine et son comportement dans le cas où la vitesse de rotation de rotor est variable, ainsi que l'effet sur les énergies actifs et réactifs,

On va définir les valeurs de références telles que $i_d - ref$ et $i_q - ref$ et la vitesse de rotation de rotor dans l'interface de l'utilisateur montrée à la figure suivante :

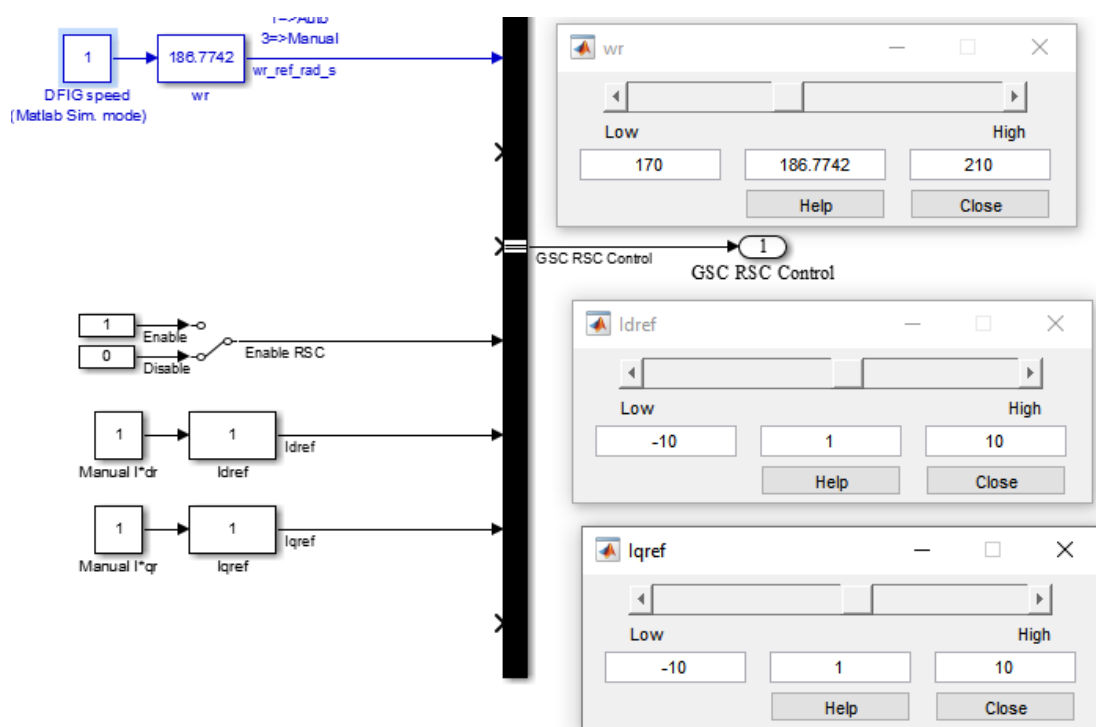


Figure 32 Choix de références dans la commande coté machine

4.1.1 Comportement de système avec vitesse de rotation fixée :

Dans la figure suivante on a fixé la valeur de vitesse de rotation du rotor en une valeur constante pour observer le comportement des deux courants id/iq :

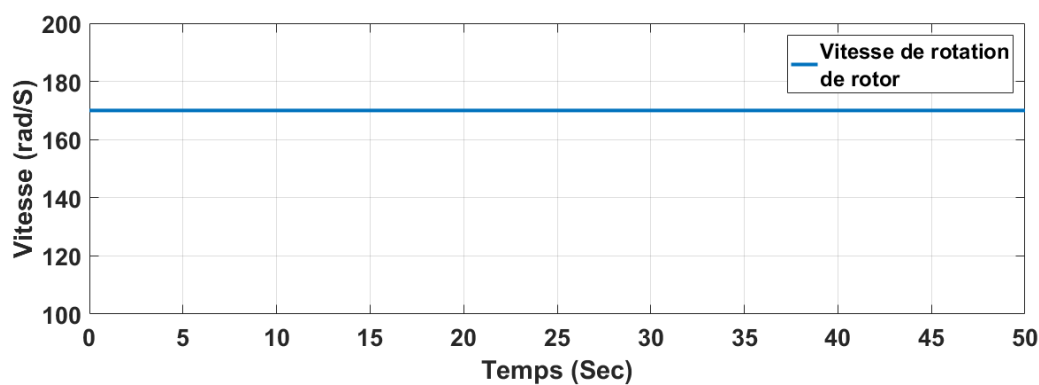


Figure 33. Vitesse de rotation de rotor

Le courants i_d/i_q suivent les valeurs désirées $i_d - ref/i_q - ref$ comme on le voit à la Figure 34 ce que veut dire que la régulation PI est réalisée correctement :

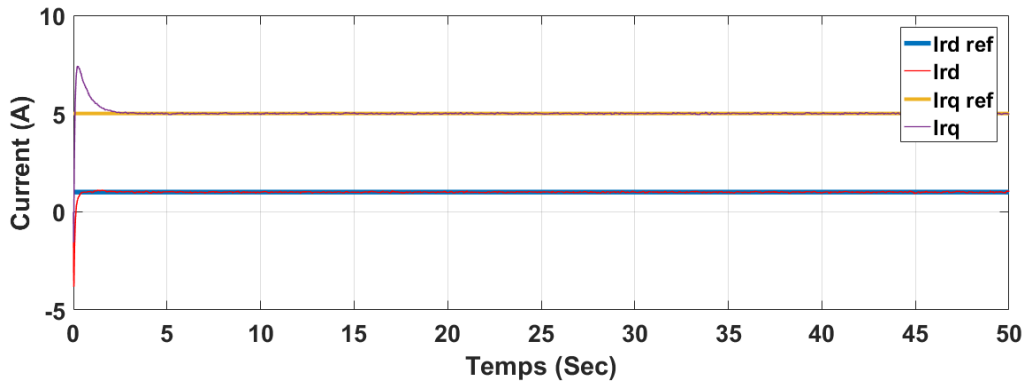


Figure 34. Commande vectorielle des courants avec vitesse de rotation fixe

Dans la figure suivante, on voit la réponse de l'énergie rotorique actif et réactif de système avec les valeurs fixes de courants et vitesse de rotation de rotor. Prenant en compte les paramètres précédent, l'énergie rotorique ne va pas changer de l'attitude et c'est bien le cas.

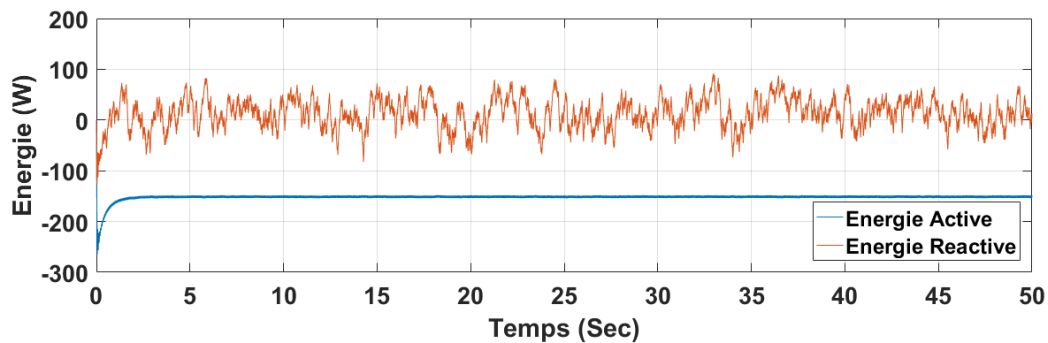


Figure 35. Énergie rotorique avec vitesse de rotation fixée

4.1.2 Réponse de système avec vitesse de rotation variable :

Dans ce cas on va effectuer la simulation avec une vitesse de rotation variable de rotor et voir son effet sur le courant rotorique ainsi que l'énergie.

Pour changer la vitesse de rotation dans des instants différents, un algorithme qui change de ω_{r-ref} dans des temps prédéfinis durant la simulation est introduit. Et c'est pour cela qu'on voit dans la Figure 36 la vitesse de rotor en rad/s varie.

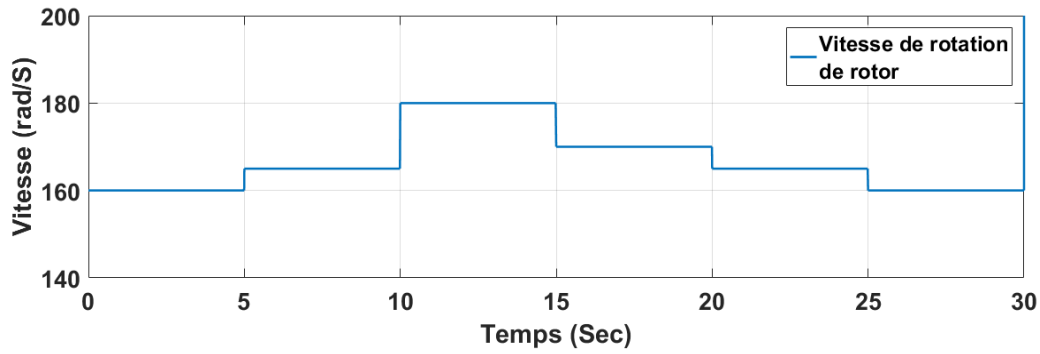


Figure 36. Vitesse de rotation variable du rotor

Dans un générateur asynchrone à double alimentation (MADA), les courants rotoriques i_d et i_q sont généralement maintenus stables grâce à un contrôle précis de la puissance active et réactive. Ces courants sont souvent définis par des valeurs de référence prédéterminées.

Pendant la période transitoire qui suit le changement de vitesse, les courants régulés peuvent s'écarter de leurs valeurs souhaitées. Ces écarts se produisent en raison du temps nécessaire au système de contrôle pour réagir et stabiliser les courants. La durée et l'amplitude des transitoires dépendent de différents facteurs, notamment de la conception du système de contrôle, de l'inertie du rotor et de la dynamique du système, la magnitude de l'écart varie en fonction de la valeur de référence. Figure 37 indique bien que le régulateur PI effectue l'opération correctement.

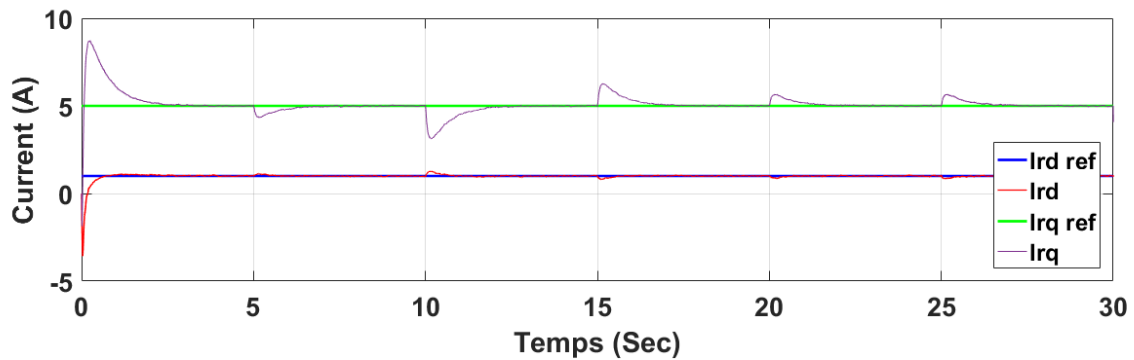


Figure 37. Régulation Id/Iq avec vitesse variable

Dans la Figure 38 l'énergie active de rotor diminue en augmentant la vitesse de rotation et vice-versa, C'est dans le but de maintenir un transfert d'énergie équilibré entre le rotor et le réseau durant la variation de vitesse de rotation.

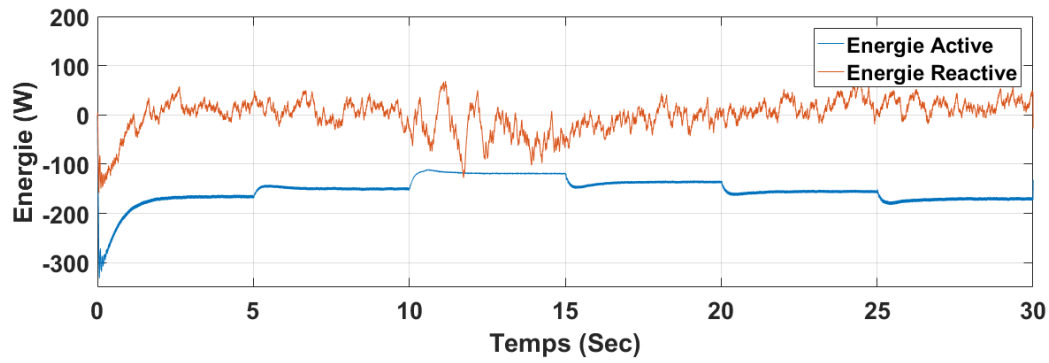


Figure 38. L'énergie rotorique avec une vitesse variable

4.1.3 Commande vectorielle des courants i_d/i_q avec une consigne variable :

Dans ce cas on a effectué deux simulation différentes ou la consigne étant variable pour l'un des courants contrôlés I_d/I_q et l'autre courant soit fixé à une valeur prédéterminée, les figures (39,41) indiquent bien que les deux courants atteintes leurs valeurs désirées successivement en changeant la référence avec le temps.

L'énergie active rotorique dans le cas où le courant I_d est variable a l'air relativement stable, Lorsque I_q est variable c'est le contraire car il y a une variation de l'énergie active autour de temps, ainsi on peut confirmer que l'énergie active de rotor est contrôlée par le courant I_q .

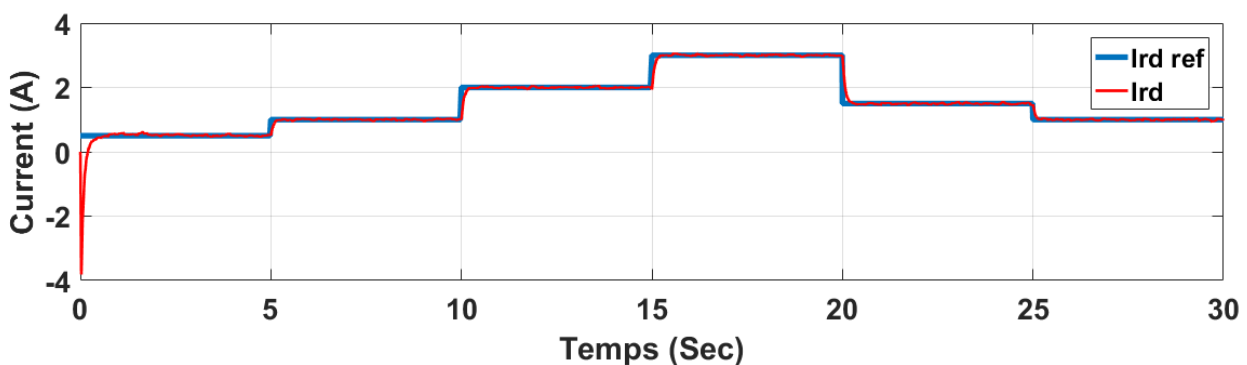


Figure 39 Consigne Ird-ref variable

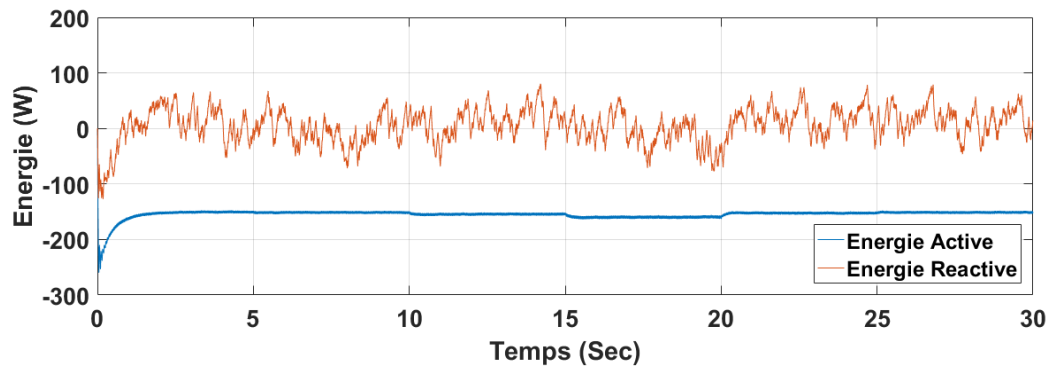
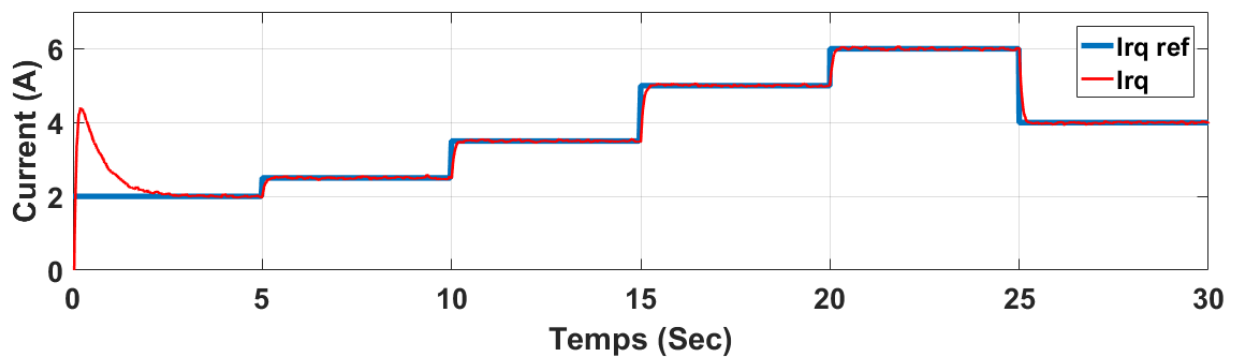
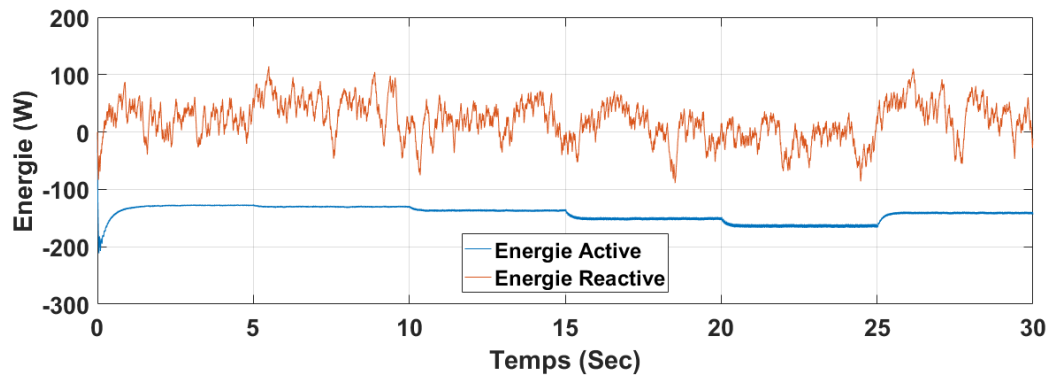
Figure 40. L'énergie rotorique en variant l'I_{rd}

Figure 41. Consigne Irq-ref variable

Figure 42. L'énergie rotorique en variant l'I_{rq}

4.2 Régulation de tension Vdc de DC-link :

La partie DC du convertisseur Back-to-back est généralement appelée le DC-link. Grâce à l'énergie stockée dans un condensateur (ou une combinaison de plusieurs condensateurs), il tente de maintenir une tension constante à ses bornes. Il assure la liaison entre le convertisseur côté réseau et le convertisseur côté rotor[19].

D'après les simulations élaborées dans les figures suivantes dans les deux situations en imposant une référence constante une fois et la changeant dans l'autre, Le voltage Vdc réussie à suivre ca valeur désirée sans écart, ce qui montre que l'étape de régulation est faite ainsi que le fonctionnement correcte de la commande coté réseau de modèle éolien basé sur une MADA.

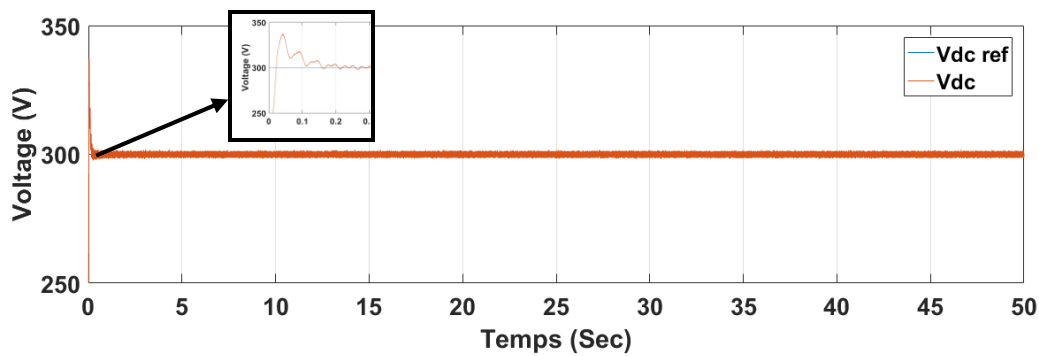


Figure 43. Régulation Vdc avec référence fixée

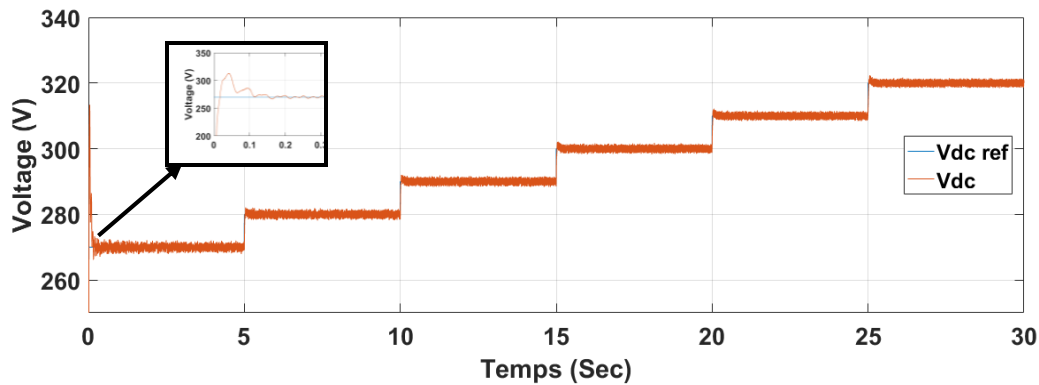


Figure 44. Régulation Vdc avec référence variable

5 Conclusion :

La simulation MATLAB Simulink joue un rôle essentiel dans l'analyse et l'optimisation des performances d'une turbine éolienne à base MADA. Grâce à Simulink, les interactions complexes entre le rotor, le réseau et les systèmes de contrôle peuvent être modélisées et simulées de manière précise. Le contrôle côté rotor régule le flux de puissance entre le rotor et le réseau, permettant un fonctionnement à vitesse variable, une meilleure qualité de puissance et une meilleure capacité de maintien en cas de perturbation. Le contrôle côté réseau garantit une intégration stable au réseau en régulant la tension et la fréquence du réseau. Les simulations Simulink permettent d'étudier en détail le comportement dynamique du système MADA, sa réponse aux perturbations et sa conformité aux normes du réseau. Elles facilitent le développement et l'évaluation de stratégies de contrôle pour une extraction de puissance optimale, une stabilité du réseau et une gestion des pannes.

En résumé, la simulation MATLAB Simulink offre des perspectives précieuses et un outil puissant pour concevoir et optimiser les performances des turbines éoliennes MADA notamment pour étudier les scénarios indésirables possibles (tel que les défauts des capteurs qu'on va traiter dans le chapitre suivant) et trouver des solutions à implémenter dans la réalité.

Chapitre 4

Défauts des Capteurs et leurs Effets sur le Fonctionnement de Système

CHAPITRE 4 : DEFAUTS DES CAPTEURS ET LEUR EFFETS SUR LE FONCTIONNEMENT DE SYSTEME

1 Introduction :

Le niveau croissant d'automatisation et sa complexité laissent souvent ces processus vulnérables à des situations anormales inattendues qui ont des impacts importants sur la sécurité, l'économie et l'environnement. Une situation anormale peut être définie comme une perturbation ou une série de perturbations dans un processus qui entraîne des écarts par rapport à son état de fonctionnement normal et peut entraîner des conséquences mineures ou catastrophiques. Pour maintenir des normes élevées de sécurité et de fiabilité dans les systèmes éoliens spécifiquement, il est important de détecter et d'isoler les conditions anormales et les erreurs aussi rapidement que possible, avant qu'elles ne dégradent le processus et ne conduisent à des incidents catastrophiques [27].

Les défauts des capteurs de tension et courant dans une éolienne peuvent avoir un impact significatif sur le fonctionnement de l'éolienne et la production d'électricité. Les capteurs de tension courants sont utilisés pour mesurer le courant électrique généré par l'éolienne, ce qui permet de surveiller et de contrôler efficacement la production d'électricité. Certains défauts courants des capteurs de tension courants dans une éolienne comprennent les problèmes de précision de mesure, les décalages de calibrage, les défaillances mécaniques, les problèmes de connectivité ou les erreurs de lecture. Lorsque les capteurs de tension courants présentent des défauts, cela peut entraîner des erreurs de mesure et des incohérences dans la production d'électricité de l'éolienne. Cela peut affecter la capacité de l'éolienne à suivre les conditions du vent et à ajuster sa production en conséquence, ce qui peut entraîner une baisse de l'efficacité et de la fiabilité de l'éolienne.

Dans notre travail on va s'intéresser des défauts de capteurs tension courants situant dans une éolienne, ces capteurs effectuent un rôle vital en terme de transmission des mesures comme des feedbacks dans les boucles de régulations fermées ou bien des informations qui informent les opérateurs dans les salles de commande, les types des défauts qu'on va examiner sont **les défauts additifs** et **les défauts multiplicatifs**.

2 Présentation des défauts :

Différents types de défauts peuvent affecter les capteurs des signaux triphasés (courant ou tension) dans le générateur et les charges d'un système d'énergie éolienne. Ces défauts peuvent être classés comme des défauts additifs et multiplicatifs.

2.1 Les défauts additifs :

Les défauts additifs se produisent lorsque des biais et des dérives apparaissent dans les mesures. De plus, les changements dans les propriétés (moyenne, variance) du capteur ainsi que les bruits peuvent être considérés comme des défauts additifs.

En présence d'un défaut additif, le signal triphasé est modélisé comme suit [28]:

$$y_{abc}^m(k) = y_{abc}(k) + V(k) + f(k) \quad (28)$$

Où : $y_{abc}^m(k) = [y_a^m(k) \ y_b^m(k) \ y_c^m(k)]^T$ et $y_{abc}(k) = [y_a(k) \ y_b(k) \ y_c(k)]^T$

Représentent respectivement les signaux triphasés mesurés et réels, $V(k)$ est une séquence gaussienne de bruit blanc de moyenne nulle avec une covariance R_V ,

Et : $f(k) = [f_a(k) \ f_b(k) \ f_c(k)]^T$ est le vecteur des défauts additifs.

Dans la situation où le défaut est absent, la fonction est supposée : $f(k) \neq 0$

2.2 Les défauts multiplicatifs :

Les changements de gain d'un capteur peuvent être considérés comme des défauts multiplicatifs. En présence d'un défaut multiplicatif, les signaux mesurés $y_{abc}^m(k)$ et les signaux réels $y_{abc}(k)$ sont reliés par l'expression suivante [28]:

$$y_{abc}^m(k) = \varepsilon(k) * y_{abc}(k) + V(k) \quad (29)$$

Où $\varepsilon(k) = \text{diag}\{\varepsilon_a(k), \varepsilon_b(k), \varepsilon_c(k)\}$ est la matrice des gains de défauts des capteurs.

Dans la situation où le défaut est absent on suppose que : $\varepsilon(k) = 1$

3 Modélisation des défauts dans MATLAB/Simulink :

Dans cette partie, on va modéliser des défauts additifs et multiplicatifs des signaux triphasés/monophasés à travers Simulink pour les injecter dans notre système éolien à base MADA pour observer et analyser ensuite l'influence de ces défauts sur le fonctionnement de système. Les figures suivantes montrent les modèles de défauts qu'on a injectés dans le système :

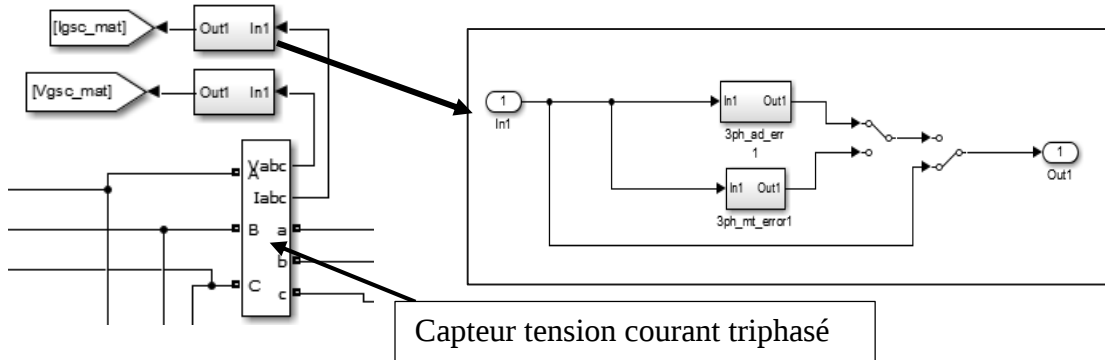


Figure 45. Positionnement des blocs de défauts sur le système

D'après la Figure 45 on voit bien que les blocs de défauts sont situés d'une façon que la valeur réelle mesurées (sans défaut) va avoir une perturbation avant d'arriver aux dispositifs de commande ou d'affichage, la Figure 46 indique les types des blocs des défauts utilisés :

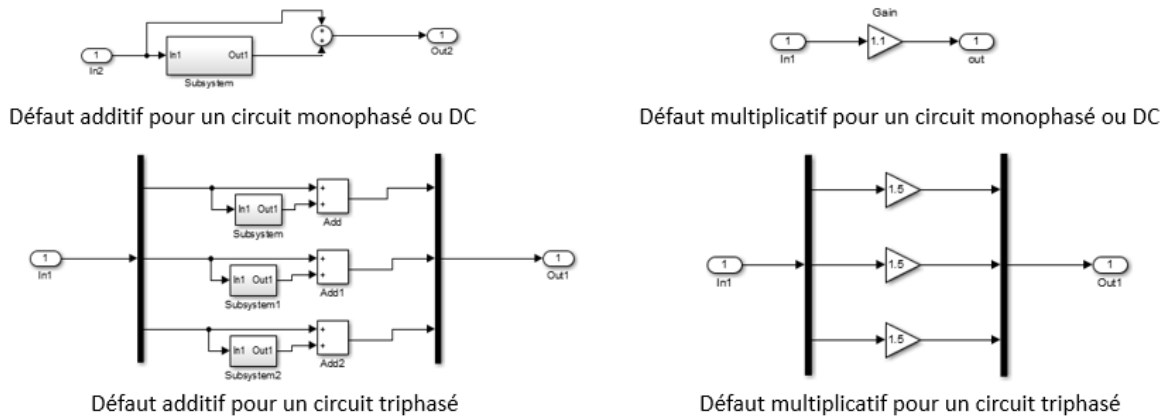


Figure 46. Blocs Simulink des défauts

Les sous-systèmes ajoutés à la valeur de mesure calculent à chaque fois un pourcentage prédéfini de la mesure pour l'ajouter ensuite à la sortie, affirmant que l'écart de défaut additif va se varier en fonction de la mesure.

4 Simulation et effets des défauts :

Un faux feedback d'un capteur qui rentre vers un régulateur PI va résulter ensuite une fausse commande de régulateur, l'écart résultant à cause des défauts va inciter le régulateur de réduire un écart qui n'existe pas en réalité.

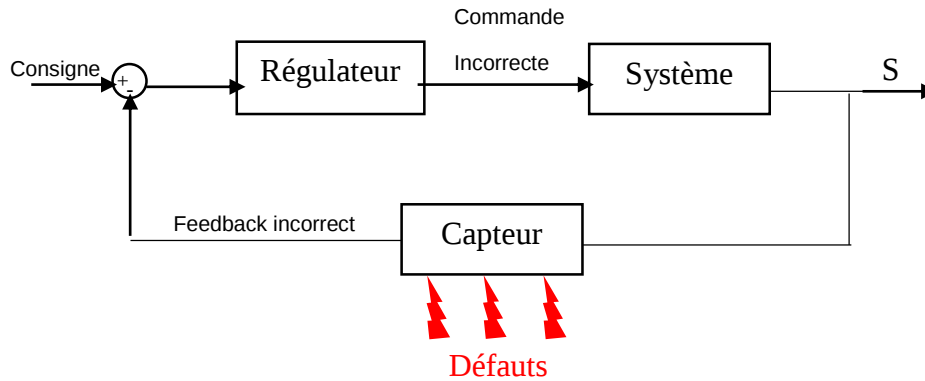


Figure 47. Les défauts des capteurs dans une boucle de régulation

Pour bien exprimer les effets de défauts on a réalisé des simulations différentes en changeant les valeurs des défauts additifs et multiplicatifs injectés sur les deux contrôleurs (coté machine et coté réseau)

4.1 Les défauts de boucle de régulation DC-link :

Un faux feedback d'un capteur qui rentre vers un régulateur PI va résulter ensuite une fausse commande de régulateur, l'écart résultant à cause des défauts va inciter le régulateur de réduire un écart qui n'existe pas en réalité.

Pour une première fois on a comparé entre la mesure et la référence de tension V_{dc} dans le cas d'absence des défauts, la Figure 48 montre le résultat obtenu, le comportement oscillatoire de la tension Vdc est à cause des interactions entre la commande des courants I_d / I_q et la régulation Vdc.

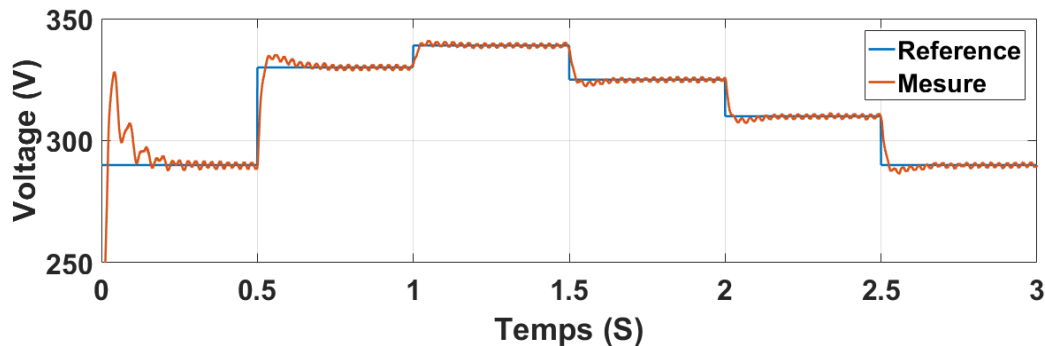


Figure 48. Régulation DC-link avec absence de défauts

D'après la Figure 48 on peut constater que à l'absence des défauts la mesure réelle de tension suit sa référence successivement.

Dans les figures suivantes on va injecter des défauts additifs/multiplicatifs et analyser les effets observés.

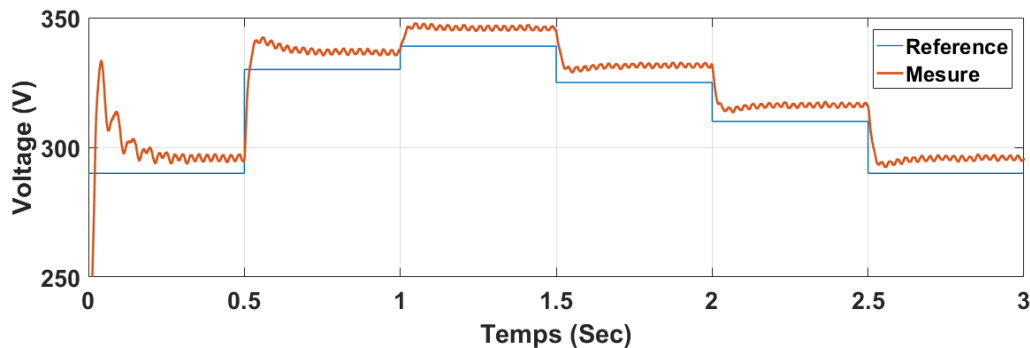


Figure 49. Défaut additif de pourcentage -2%

On voit bien sur la Figure 49 une apparition d'un écart après l'injection de défaut additif, puisque le signe est négatif la mesure a dépassé la référence définie donc l'écart (référence-mesure) est négatif, contrairement lorsque on a appliqué un défaut additif du signe (+) l'écart est devenu positif.

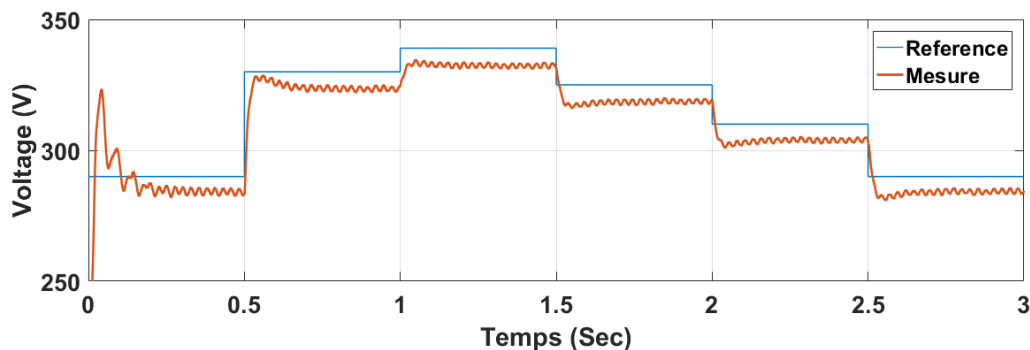


Figure 50. Défaut additif de pourcentage +2%

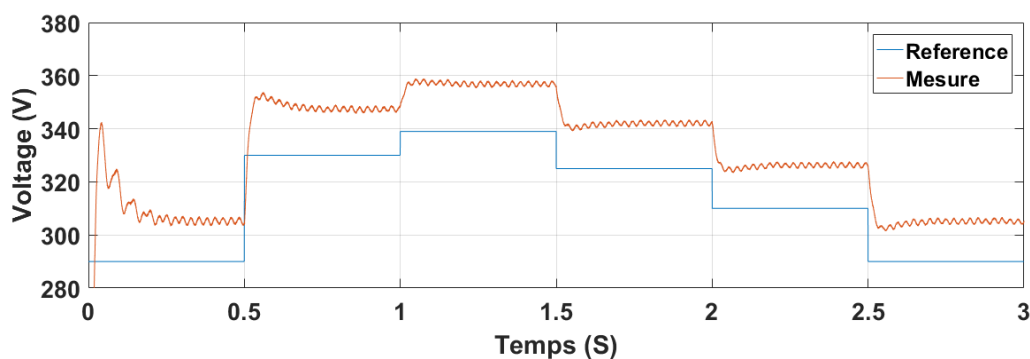


Figure 51. Défaut additif de -5%

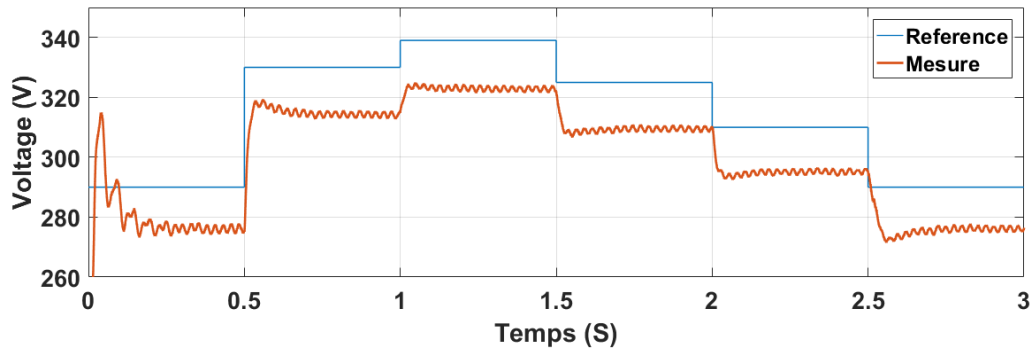


Figure 52. Défaut additif de +5%

Dans les figures 51 et 52 on a injecté des défauts additifs avec les pourcentages de -5% et +5% respectivement, la marge de l'erreur a augmentée lorsque on a changé le pourcentage de défauts, on peut conclure que l'écart entre la mesure et la référence augmente à chaque fois que la valeur absolue de défaut additif s'augmente et vice-versa.

Maintenant on va injecter des défauts multiplicatifs sur le capteur de tension V_{dc} utilisant des gains différents durant les simulations, Les figures 53, 54, 55 et 56 montrent l'effet de défauts multiplicatifs sur la régulation PI de DC-link.

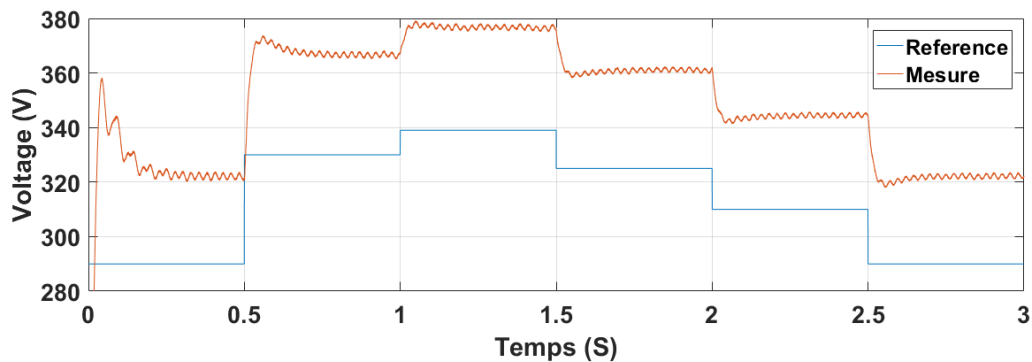


Figure 53. Défaut multiplicatif du gain 0.9

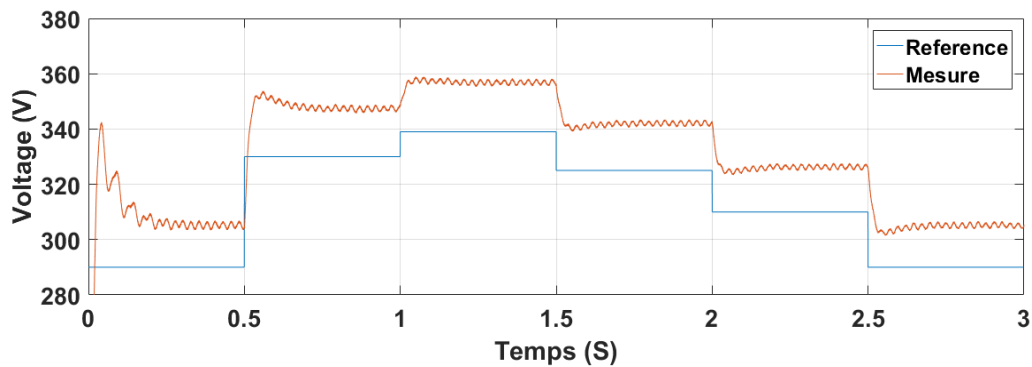


Figure 54. Défaut multiplicatif du gain 0.95

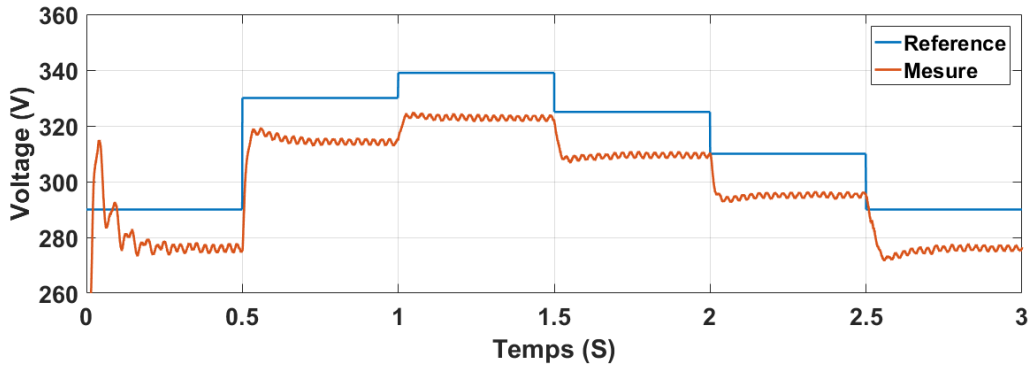


Figure 55. Défaut multiplicatif du gain 1.05

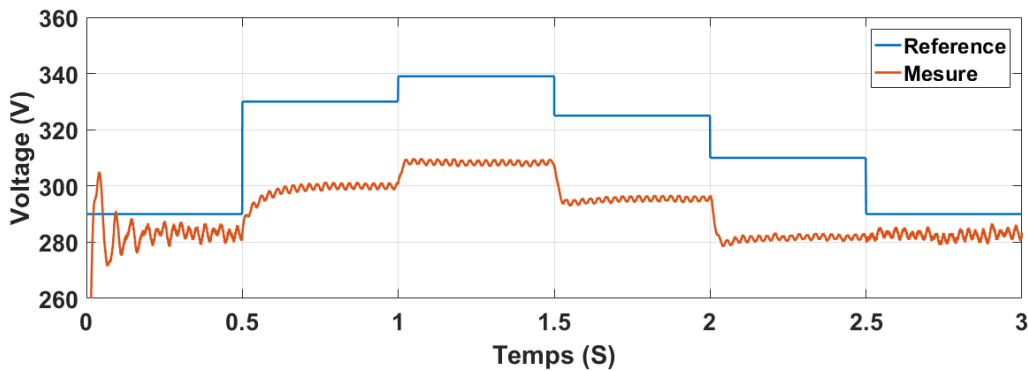


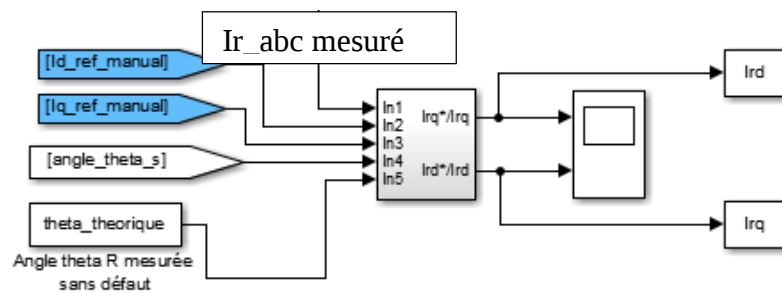
Figure 56. Défaut multiplicatif du gain 1.1

On peut constater que les défauts multiplicatifs ont eux même un impact remarquable sur le système, La marge de défauts s'accroît à chaque fois que le gain s'éloigne de 1, dans les défauts multiplicatifs l'écart entre la mesure et la référence change en fonction de la référence.

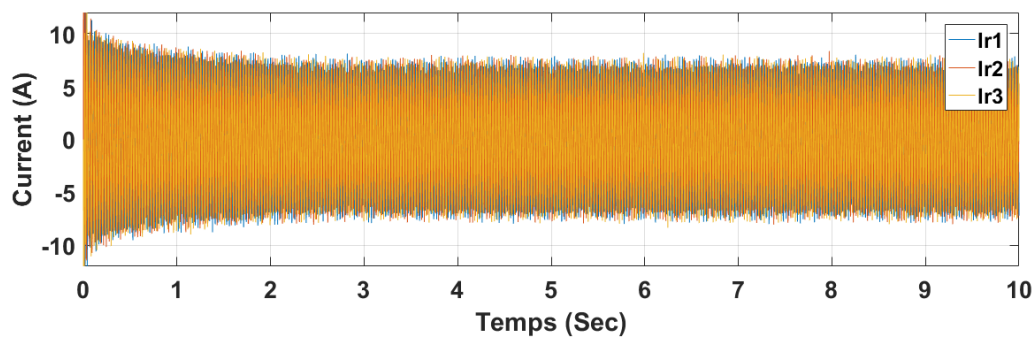
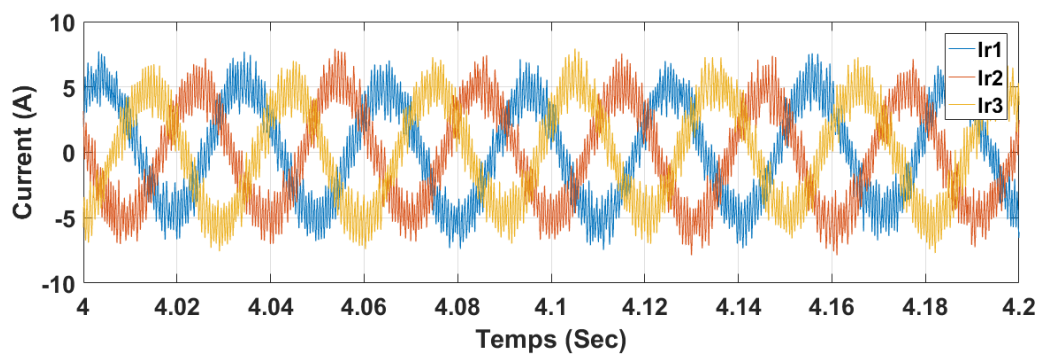
4.2 Défauts de commande vectorielle :

Dans cette partie on va injecter des défauts additifs et multiplicatifs sur le capteur tension/courant rotorique, ce capteur mesure le courant rotorique $i_{r_{abc}}$ et cette mesure va être convertie au référentiel (d-q) pour obtenir les 2 courants i_d et i_q qui font part de la boucle de régulation PI, un défaut sur ce capteur va perturber la régulation et résulter une instabilité potentielle dans le système.

On a modélisé le bloc suivant qui fait la conversion de la valeur réelle de courant rotorique car les valeurs des courants i_d et i_q qui s'affichent dans l'interface de l'utilisateur sont affectées par le défaut une fois il est injecté.

Figure 57. Conversion de mesure réelle I_{r_abc}

En ce cas on a simulé le système sans aucun défaut, La Figure 60 montre bien que dans le fonctionnement correct de système en remarquant qu'aucun écart ne va s'apparaître dans la commande vectorielle des courant rotorique au référentiel (d-q).

Figure 58. Courant I_{r_abc} sans défautFigure 59. Courant I_{r_abc} sans défaut - zoom

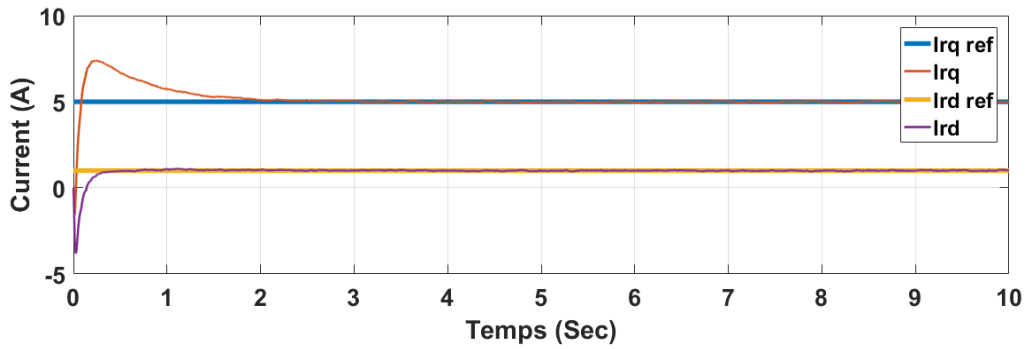


Figure 60. Commande id/iq sans défaut

On a injecté in défaut multiplicatif ayant un gain de 0.7 sur la phase A de capteur courant rotorique, l'effet de ce défaut est présenté sur les figures 61 et 62, la phase affecté par le défaut va avoir un écart avec celle mesuré sans défaut dans la simulation précédente.

Comme indiqué à la Figure 62 un écart est apparu entre la mesure et ça référence, cet écart n'est pas assez remarquable concernant le courant I_{rq} notant que la valeur $I_{rq-ref} = 1$, ce qui confirme que la marge de l'écart de défaut est liée à la valeur de référence ainsi que la proportion de défaut.

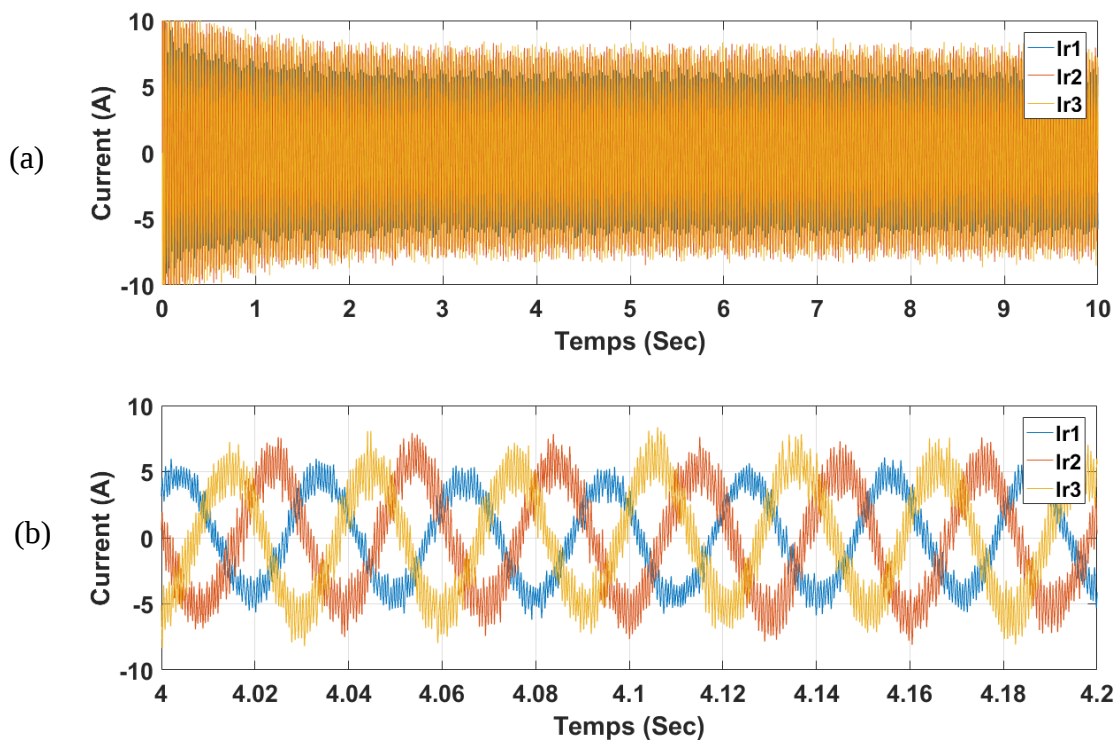


Figure 61. (a) Mesure de capteur courant I_{r_abc} avec défaut multiplicatif de gain 0.7 (Phase A) (b) Zoom de signal

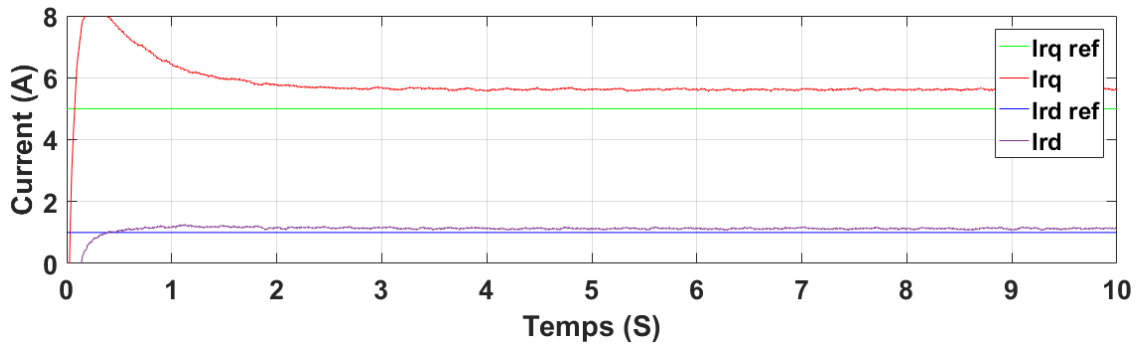


Figure 62. Les courants Id/Iq avec un défaut multiplicatif de gain 0.7 (Phase A)

On va répéter la simulation pour deux autres cas en injectant un défaut multiplicatif de gain 0.7 sur les phases (A,B) et ensuite on va injecter un défaut multiplicatif ayant un gain supérieur à 1 (1.3) pour vérifier, les résultats obtenus sont comme suite :

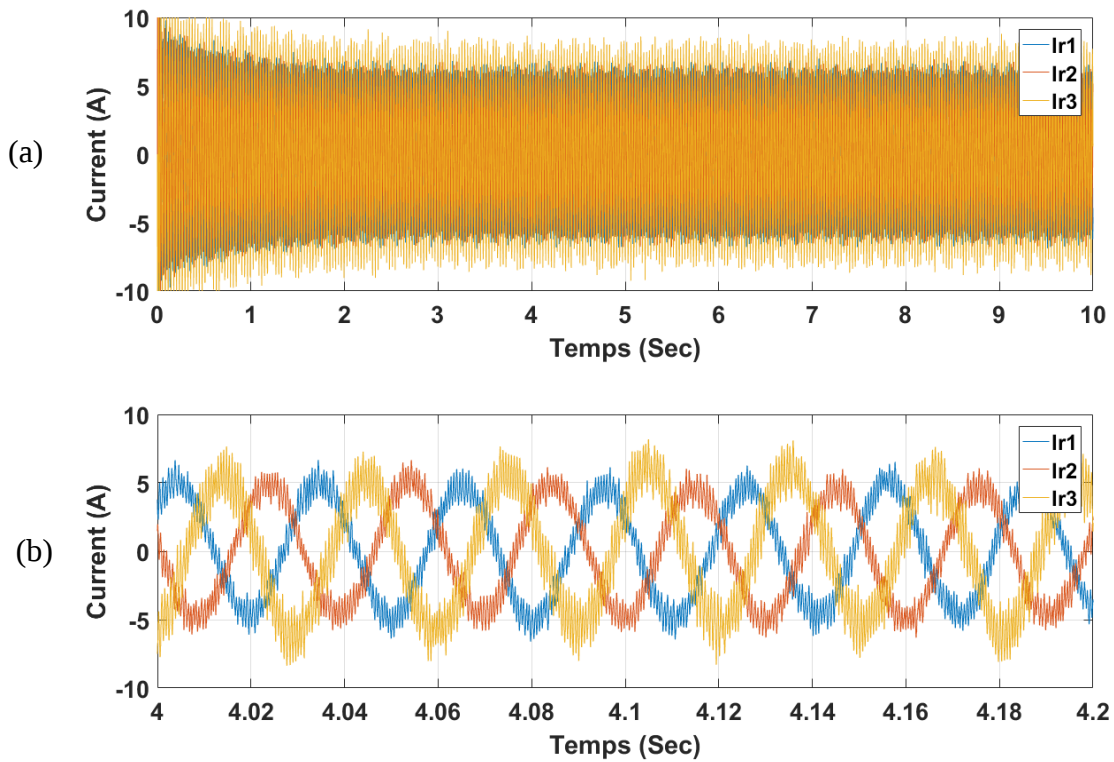


Figure 63. (a) Mesure de capteur courant Ir_abc avec défaut multiplicatif de gain 0.7 (Phases A,B) (b) Zoom de signal

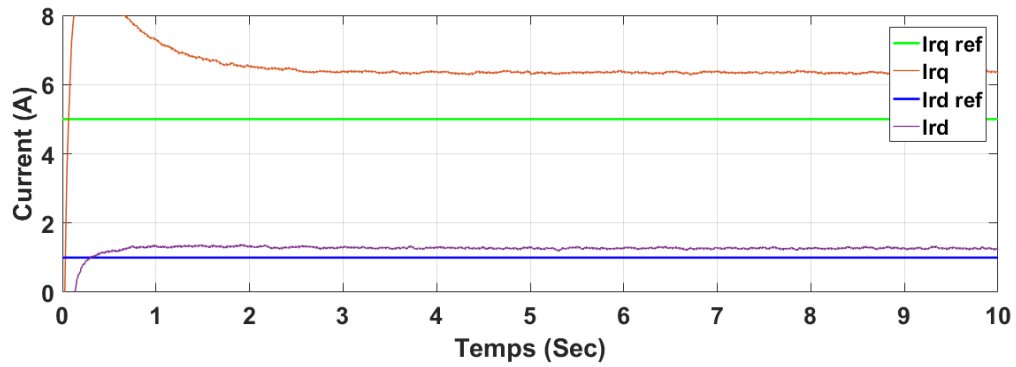


Figure 64. Les courants Id/Iq avec un défaut multiplicatif de gain 0.7 (Phases A,B)

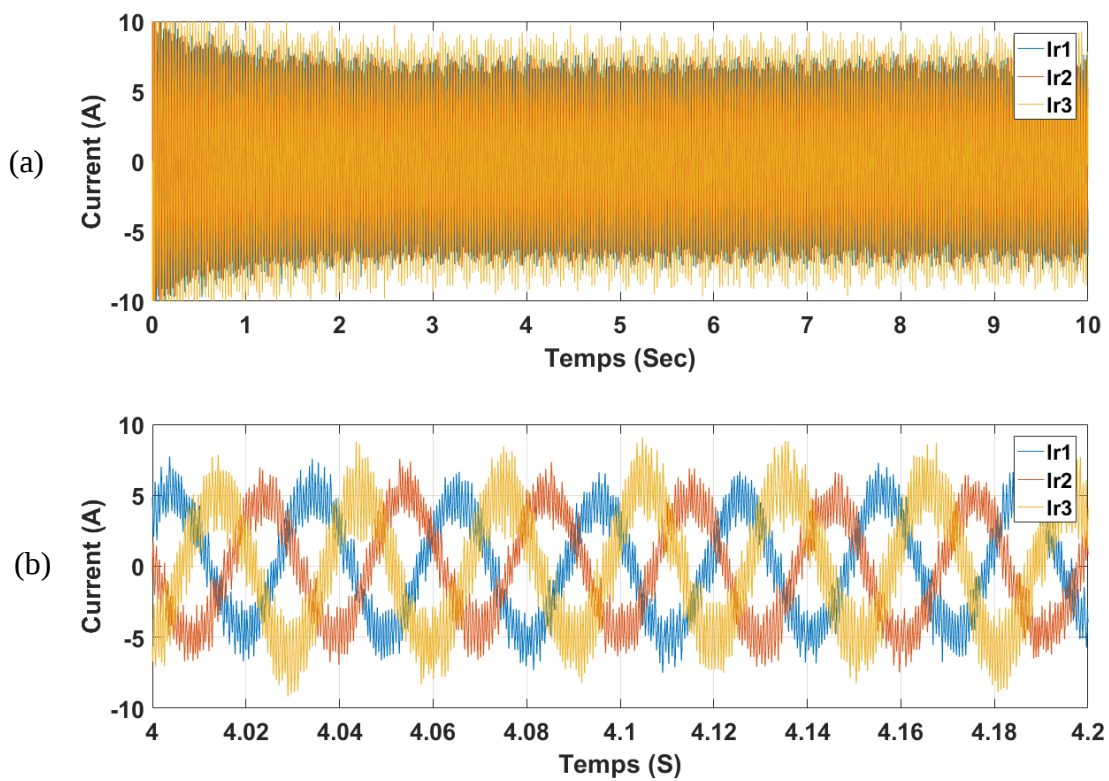


Figure 65. (a) Mesure de capteur courant Ir_abc avec défaut multiplicatif de gain 1.3 (Phase C) (b) Zoom de signal

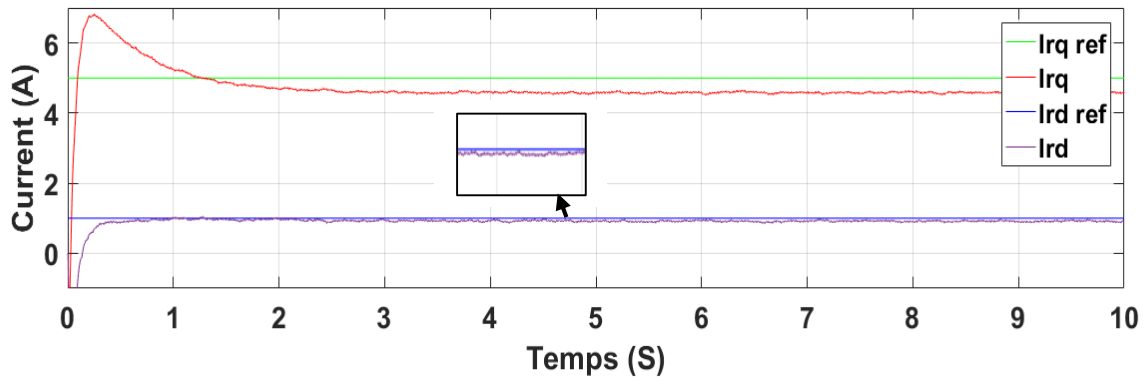


Figure 66. Les courants I_d/I_q avec un défaut multiplicatif de gain 1.3 (Phases C)

Quand on a injecté le défaut dans une seule phase seule la phase affectée qui a changée de l'amplitude en diminuant ou en augmentant comme il est indiqué dans les figures (61,63 et 65) et donc seule les phases où le capteur est défectueux vont être affecté par le défaut dans les signaux sinusoïdaux triphasés (Figure 63, 65).

Durant la régulation PI des courant I_d et I_q , la marge de l'écart entre la mesure réelle et la référence augmente en augmentant le nombre des phases défectueuses ou le gain de défaut multiplicatif (Figures 62,64,66).

5 Conclusion :

Une boucle de régulation est constituée généralement d'un régulateur, système à commander et un capteur qui transmet l'information de nouveau pour le régulateur, un problème survenant dans l'un des éléments précédents va perturber directement l'opération de régulation, Dans un système éolien à base MADA le feedback rentrant dans les régulateurs PI dans la commande côté machine et la commande côté réseau sont obtenus essentiellement par le capteur de courant rotorique et le capteur de tension V_{dc} respectivement.

La présence de défauts additifs et multiplicatifs dans les capteurs du modèle éolien tels que celles de tension V_{dc} et les capteurs de courant triphasés de rotor peut avoir un impact significatif sur la stratégie de contrôle d'un modèle de simulation d'une éolienne avec machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Les défauts additifs, qui introduisent des perturbations ou des erreurs directement dans les signaux de tension ou de courant mesurés, peuvent causer des erreurs de décalage dans les mesures des capteurs. Ces erreurs peuvent conduire à une estimation erronée de l'état du système, compromettant ainsi l'efficacité de la stratégie de contrôle. Le système de contrôle peut ne pas être en mesure de suivre précisément le point de fonctionnement optimal ou de maintenir la puissance souhaitée, ce qui entraîne une réduction de l'efficacité et des problèmes potentiels de stabilité.

D'autre part, les défauts multiplicatifs introduisent des facteurs d'échelle ou d'atténuation dans les mesures des capteurs. Cela peut entraîner des erreurs d'amplitude et de phase, affectant ainsi la précision de la stratégie de contrôle. Le système de contrôle peut interpréter de manière

incorrecte les conditions réelles du système, ce qui entraîne un contrôle incorrect du couple et de la puissance. Par conséquent, l'éolienne peut ne pas fonctionner à son rendement optimal, et des problèmes tels que des contraintes mécaniques et des problèmes de synchronisation avec le réseau peuvent survenir.

Pour atténuer les effets des défauts additifs et multiplicatifs, des techniques robustes de détection et de compensation des défauts doivent être intégrées à la stratégie de contrôle du modèle de simulation. La surveillance et l'analyse en temps réel des mesures des capteurs peuvent aider à identifier la présence de défauts et à déclencher des actions correctives appropriées. Des techniques telles que les algorithmes de traitement du signal, les stratégies de contrôle tolérantes aux défauts et les approches de contrôle adaptatif peuvent être utilisées pour compenser les mesures erronées des capteurs et garantir un contrôle précis.

De plus, des tests approfondis et une validation de la stratégie de contrôle dans différents scénarios de défaut sont nécessaires pour évaluer sa robustesse et ses performances. Des simulations et des expérimentations peuvent être réalisées pour évaluer la capacité du système de contrôle à détecter et à réagir aux défauts additifs et multiplicatifs, garantissant ainsi un fonctionnement fiable de la simulation de l'éolienne.

En conclusion, il est essentiel de prendre en compte les défauts additifs et multiplicatifs dans les capteurs de tension VDC et les capteurs de rotor triphasés afin de concevoir une stratégie de contrôle efficace et résiliente pour un modèle de simulation d'une éolienne MADA. En incorporant des techniques de détection et de compensation des défauts, le système de contrôle peut s'adapter aux mesures erronées des capteurs et maintenir les performances optimales de l'éolienne, contribuant ainsi à une efficacité, une stabilité et une fiabilité accrues de l'éolienne.

Chapitre 5

Méthode de Redondance pour Diagnostic des Défaits des Capteurs

CHAPITRE 5 : METHODE DE REDONDANCE POUR DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES CAPTEURS

1 Introduction :

En pratique, les mesures courant-tension sont obtenues à l'aide de capteurs. Ainsi, un retour d'information erroné causé par une défaillance du capteur peut compromettre les performances du système contrôlé et potentiellement entraîner une défaillance du système électrique. Il est donc crucial de garantir la fiabilité des données mesurées par le capteur.

Les capteurs doivent être garantis avant leur utilisation dans la boucle de contrôle afin de répondre aux performances souhaitées. La détection et l'isolement des défauts (FDI) pour la surveillance des conditions des capteurs utilisés dans les entraînements électriques peut être intégrée à la configuration de contrôle. Une telle intégration permet une détection rapide des erreurs de mesure et leur prise en charge afin de compenser leur effet sur le système contrôlé.

L'une des méthodes effectives pour la détection et isolation des défauts c'est la redondance des capteurs, L'isolation des pannes par redondance vise à identifier et isoler les pannes en utilisant des composants ou des systèmes redondants et analysant leurs sorties. Cette approche permet de détecter les capteurs ou les composants défectueux en comparant les mesures ou les signaux provenant de sources redondantes. Si des incohérences ou des écarts sont détectés, cela indique une panne potentielle dans l'un des éléments redondants, ce qui permet d'identifier et d'isoler le composant défectueux. Un algorithme doit être mis en place pour traiter les données mesurées par les capteurs redondants afin de garantir la précision et la robustesse des systèmes de commande.

2 Redondance des capteurs :

Cette méthode fait référence à l'utilisation de mesures ou d'informations redondantes pour détecter et diagnostiquer des défauts ou des incohérences dans un système ou un processus. Cela implique de comparer et d'analyser plusieurs sources de données ou de mesures pour identifier des écarts, des déviations ou des erreurs pouvant indiquer un défaut ou une anomalie.

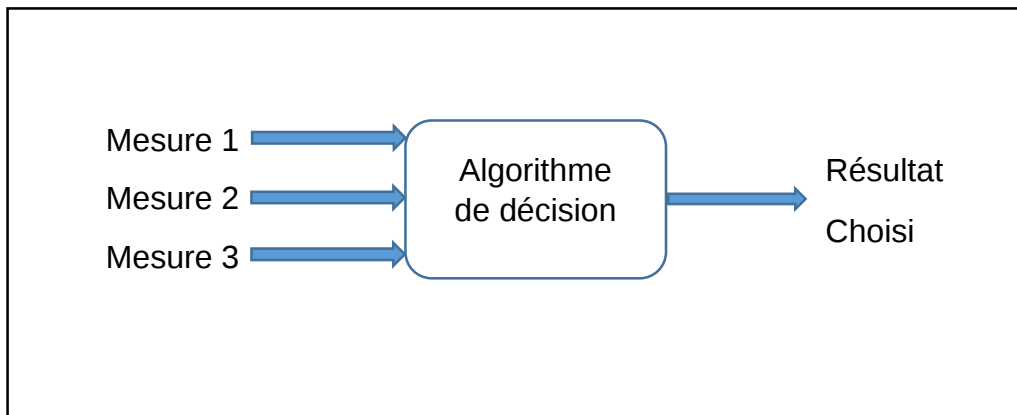


Figure 67. Schéma d'un approche de FDI à base redondance des capteurs

Comme on a montré dans le chapitre précédent, les défauts des capteurs pourraient conduire au fonctionnement erroné de système, cela nécessite de trouver un approche de détection et l'isolation des défauts des capteurs. Ainsi on va implémenter une stratégie basée sur la redondance des capteurs de tension et courant pour les signaux monophasés comme celle de tension V_{dc} et aussi les signaux sinusoïdaux triphasés, En utilisant trois capteurs pour chaque mesure et en appliquant un algorithme de décision qui va traiter les valeurs mesurées et les comparer afin de détecter les fonctionnements malveillant des capteurs et les isoler, cette façon va garantir la fiabilité et la robustesse des dispositifs de mesure.

Cette méthode est convenable considérant que le fait d'avoir tous les capteurs redondants défaillants à la fois très rare, et lorsqu'il s'agit des défauts des capteurs.

3 Modélisation Matlab/Simulink de la méthode :

Le modèle éolien à base à MADA qu'on a traité possède deux contrôleurs (coté réseau & coté machine), La commande coté réseau se concentre à la régulation de la tension V_{dc} sur une référence prédéfinie et la commande coté machine est le contrôle des courants rotoriques I_d/I_q . Pour appliquer la méthode de détection et isolation sur le capteur tension V_{dc} il nécessite d'utiliser un seule dispositif de sélection car on a un signal DC monophasé, mais pour le courant rotorique et puisque il est triphasé, 3 unités de sélection sont mise en place pour les 3 phases (ABC). La figure suivante définit la mise en place des blocs FDI dans le modèle Simulink :

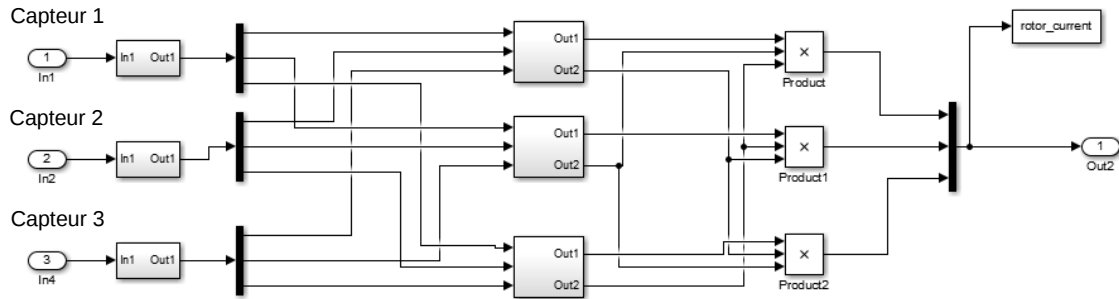


Figure 68. Modèle FDI à base de redondance des capteurs pour un capteur courant triphasé

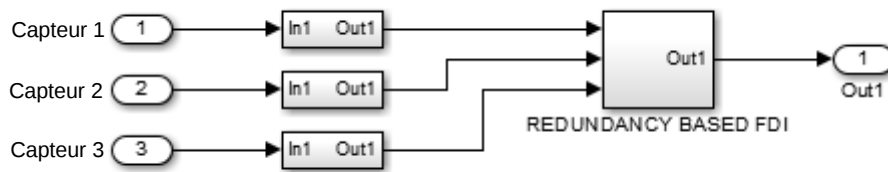


Figure 69. Modèle FDI à base de redondance des capteurs pour un capteur de tension DC-link

Comme indiqué dans la Figure 68, chaque unité de mesure possède 3 capteurs pour mesurer le courant triphasé, donc on a utilisé trois blocs de détection et isolation pour les trois phases ABC des capteurs redondant installés.

Le modèle FDI utilisé est basé sur un algorithme de sélection en utilisant 3 mesures différentes en suivant certaines étapes.

Trois soustractions sont faite pour obtenir l'écart entre les trois mesures comme indiqué dans la Figure 70, les trois valeurs obtenues sont cruciales dans le fonctionnement de l'algorithme.

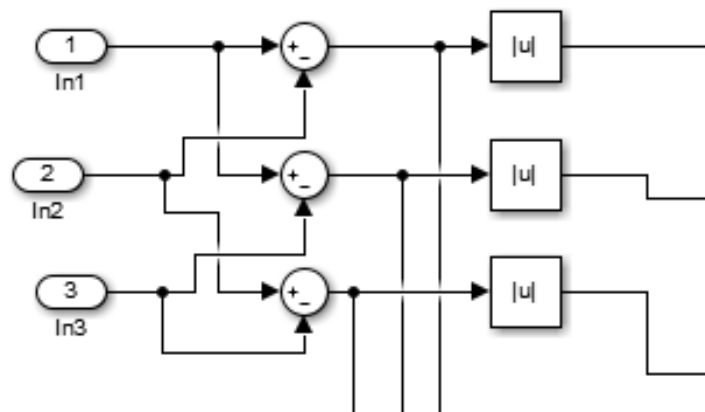


Figure 70. Soustraction des mesures

En imposant un seuil qui conforme les caractéristiques de procédé, si le résultat donné par la soustraction de deux capteurs dépasse le seuil défini, cela veut dire que un des deux capteurs est défectueux, donc il reste de définir le capteur ayant un défaut en comparant les trois soustractions entre les 3 capteurs et faisant des opérations logiques pour obtenir finalement le capteur à isoler.

Un facteur de 1 est associé à chaque opération correcte et le facteur 0 est utilisé donc pour identifier les dépassements des seuils. Les cas possibles concernant les défauts des capteurs durant le fonctionnement peuvent être résumés dans un tableau de vérité, notant que le fait d'avoir 2 ou plus capteurs défectueux implique le fonctionnement incorrecte de système.

Tableau 2 Tableau de vérité des défauts de capteurs

Mesure (1-2)	Mesure (1-3)	Mesure (2-3)	
0	0	1	Défaut capteur 1
0	1	0	Défaut capteur 2
1	0	0	Défaut capteur 3
0	0	0	Défaut de 2 capteurs ou plus
1	1	1	Aucun défaut
0	1	1	Aucun défaut
1	0	1	Aucun défaut
1	1	0	Aucun défaut

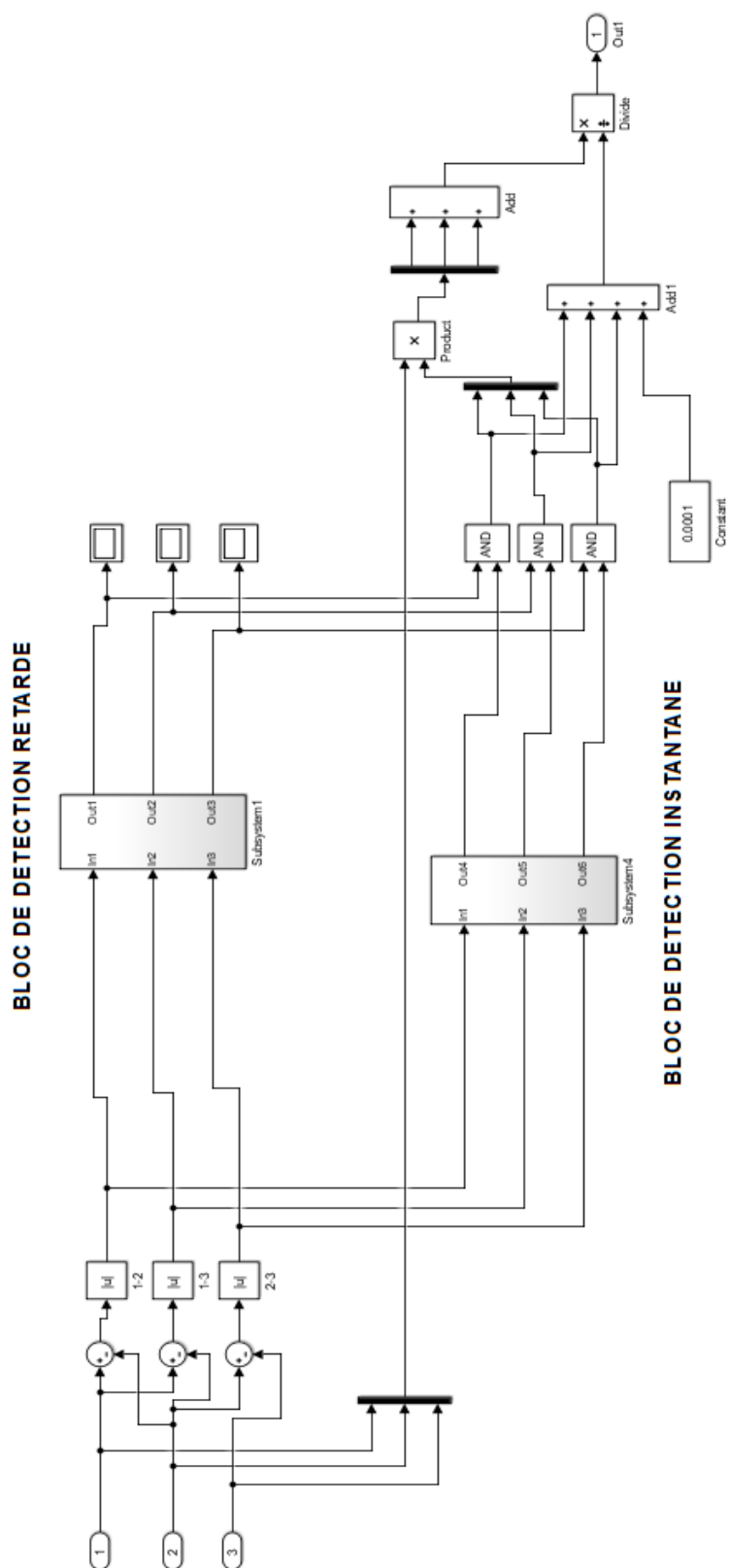


Figure 71. L'algorithme FDI à base de redondance des capteurs

Pour distinguer entre les défauts occasionnels qui ne plus répètent après un court intervalle et les défauts permanents qui nécessitent l'isolation définitif de capteurs, un retard est appliqué dans le bloc d'identification des défauts, et pour éviter le fait d'avoir affecté par ces court défauts il y'a un bloc de détection instantané placé en parallèle.

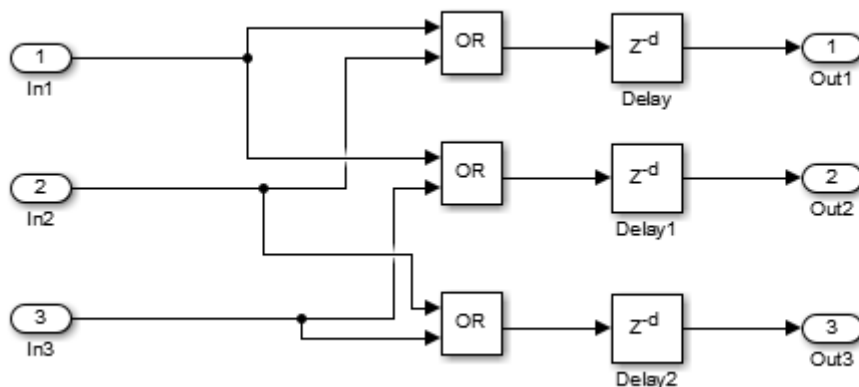


Figure 72 Mise en place des blocs de retard unitaire

La figure suivante montre la réponse des deux blocs durant un des défauts injecté dans l'un des capteurs de système.

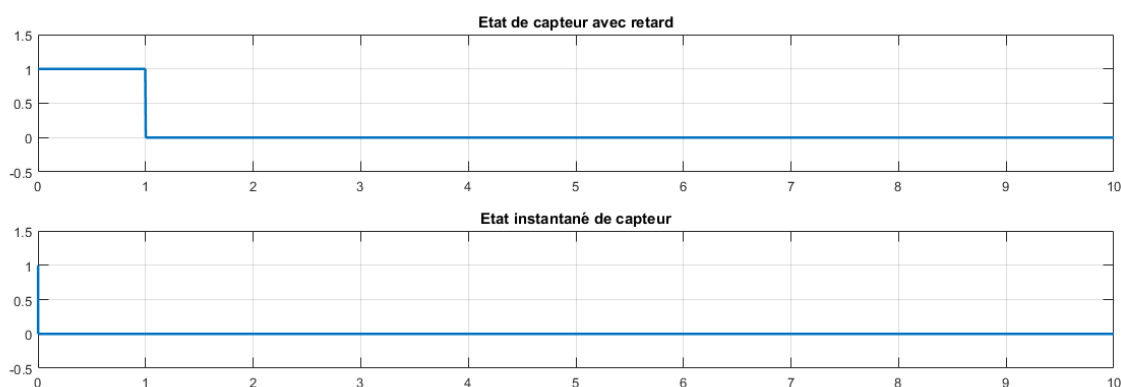


Figure 73. Détection retardé de défauts des capteurs

4 Simulation et résultats :

Dans cette partie on a effectué des simulations de système en injectant des défauts pour tester l'efficacité de modèle FDI quand il s'agit des défauts des capteurs.

Dans la Figure 74 on peut bien remarquer l'effet d'un défaut additif de 5% sur la mesure réelle de tension V_{dc} , donc on a simulé cette fois le système avec le modèle FDI mise en place en injectant le même défaut de +5% avec une consigne variable.

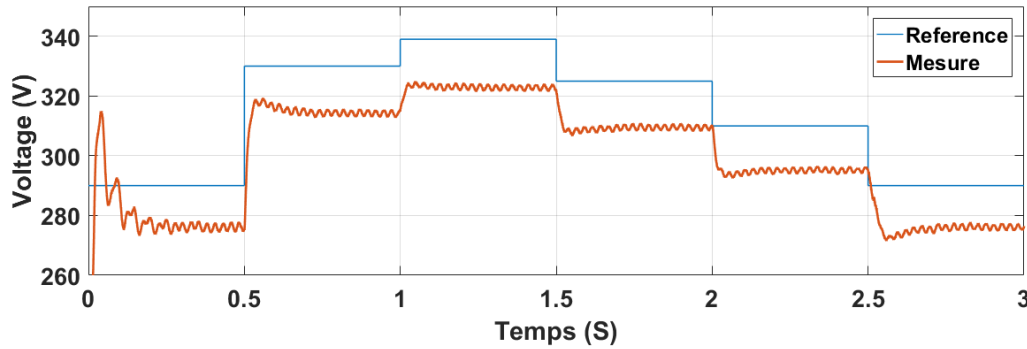


Figure 74. Effet de défaut additif de +5%

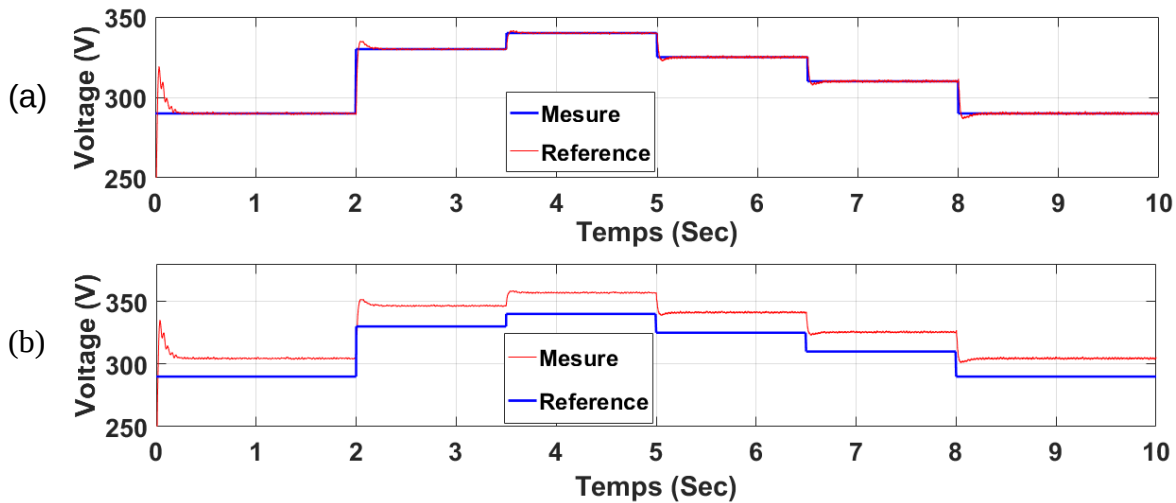


Figure 75. (a) Mesure de V_{dc} de système en appliquant la FDI (b) Sortie de capteur défectueux

D'après la Figure 75 et malgré la sortie de capteur est incorrecte (b), aucun écart entre la mesure et la référence est observé (a) ce qui veut dire que l'approche de détection et isolation des défauts intégré a arrivé d'éliminer les effets des défauts injectés dans le capteur, ce qui va garantir la protection de système des dangers potentiels concernant le fonctionnement et la sécurité.

De la même façon on va tester le rendement de méthode sur la commande vectorielle et la mesure de courant rotorique I_{r-abc} , c'est pour cela on a injecté à l'instant $t = 5$ s un défaut

additif qui rajoute un constant du 4 à la mesure de phase A de capteur avant la mise en place de dispositif de détection et isolation.

On peut remarquer un comportement erroné dans les figures suivantes (76,77,78) où la sortie de capteur défectueux a affecté le signal du courant triphasé ce qui a causé une incertitude dans la commande vectorielle des courant I_d et I_q à partir du l'instant $t = 5\text{ s}$ (le moment où le défaut est injecté)

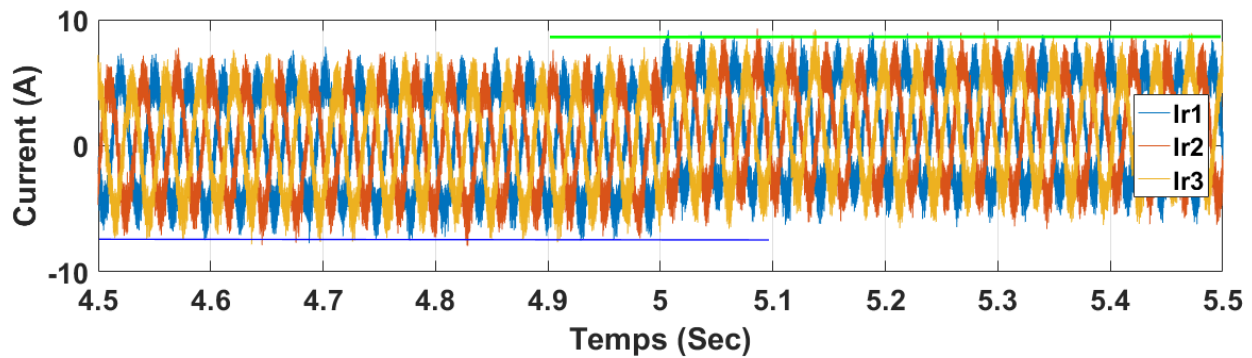


Figure 76. L'effet de défaut sur la mesure donnée par le capteur de courant rotorique

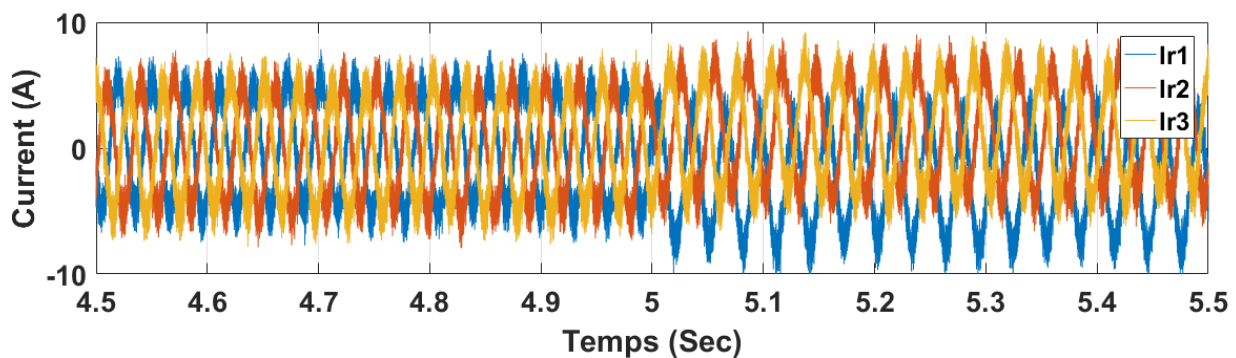


Figure 77. Courant rotorique triphasé dans le cas d'injection d'un défaut

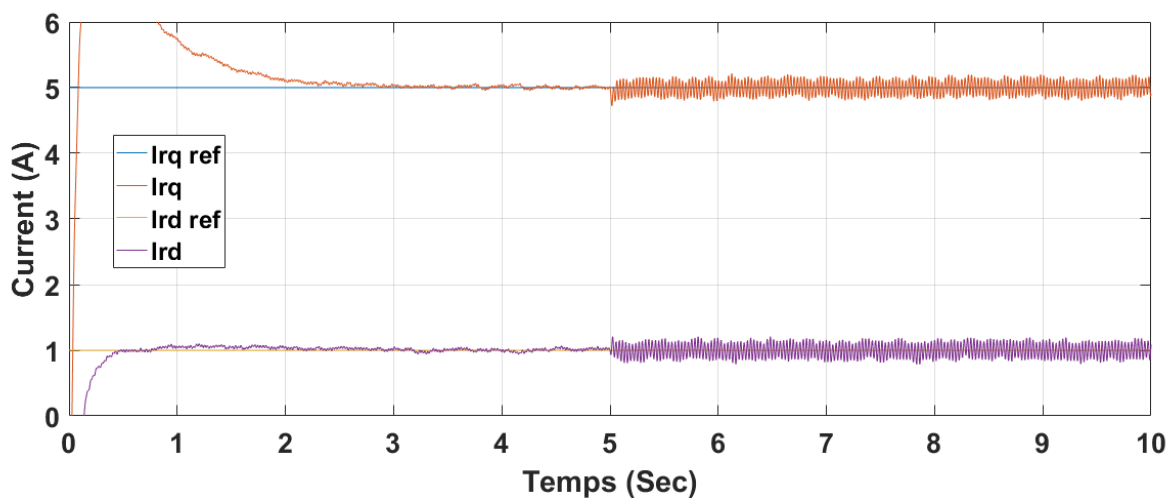


Figure 78. Effet d'un défaut additif sur la commande vectorielle

Cette fois on a injecté le même défaut dans le même instant mais en utilisant le bloc FDI à base de redondance des capteurs, le diagramme de l'état de capteur à la figure suivante indique la différence entre le système d'isolation qui isole les capteurs défectueux instantanément et le bloc de détection retardé, notant que le défaut est injecté à l'instant $t = 5$ s.

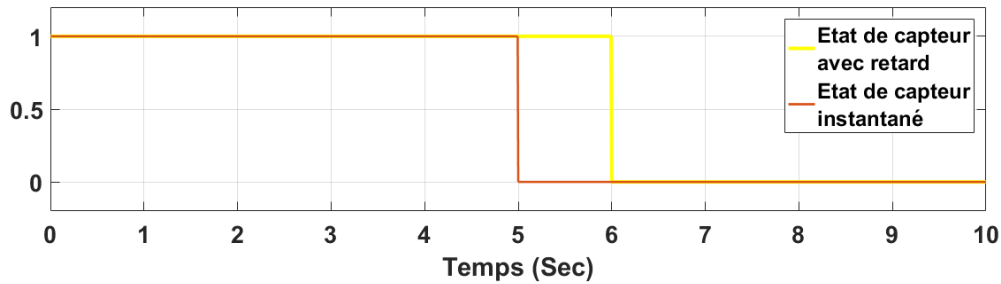


Figure 79. Etat de capteur courant à l'occurrence de défaut

La Figure 80 montre le signal donné par le capteur défectueux (b) avec le signal de mesure de système donné par l'algorithme de détection et isolation (a).

La défaillance de capteur est clairement visible à partir de l'instant $t = 5$ s mais par contre aucun changement de comportement n'est observé sur le signal de mesure de courant I_{r-abc} défini par la méthode de redondance, ce qui montre comme début que le défaut est successivement isolé.

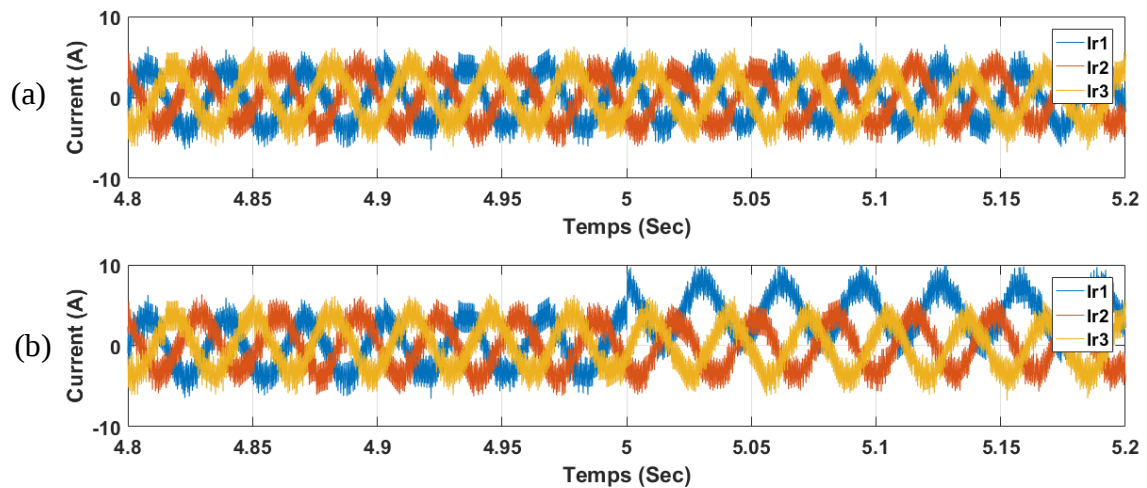


Figure 80. (a) Résultat de mesure sélectionnée par le modèle FDI (b) Résultat de mesure de capteur défectueux

Pour confirmer nos résultats on a vérifié la régulation des courants I_d I_q de rotor dans cette simulation, d'après la Figure 81 les courants suivent leurs références sans avoir les oscillations expérimentées précédemment. Malgré un pic qui est survenue à l'instant où on a injecté

le défaut le courant i_q retourne à son comportement sans défaut pour une autre fois successivement.

On peut conclure que le système a réussi de contourner les défauts injectés dans ce cas grâce au bloc de détection et isolation des défauts des capteurs implémenté dans le modèle éolien à base MADA.

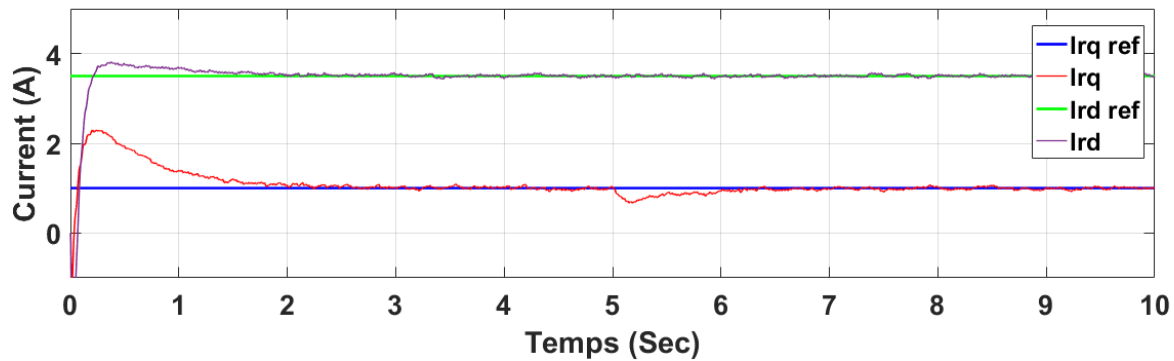


Figure 81. Commande des courants Id/Iq durant un défaut

Parlant des défauts multiplicatifs qui arrivent aux capteurs sinusoidaux, les défauts vont avoir un comportement ayant l'aire discret, la cause de ça c'est l'aspect alternatif de signal qui change son amplitude autour de temps, donc le seuil va être dépassé dans le cas où l'amplitude de signal défectueux atteint des valeurs qui mettent l'écart entre deux mesures différentes assez remarquable, donc le capteur dans ce cas est isolé d'un façon discrète.

Pour cela on a injecté dans le capteur de courant rotorique un défaut multiplicatif de gain 0.7 sur la phase 1 à l'instant $t = 5$ s pour tester l'efficacité de notre algorithme de redondance dans le cas qu'on a juste discuté.

Comme il est indiqué dans la Figure 82, les états des capteurs ont des impulsions qui signifient que le capteur est correct lorsque le seuil n'est pas dépassé, la valeur 0 signifie que le capteur est isolé à cause de défaut multiplicatif. On peut conclure que le système de détection et de l'isolation des défauts appliqué des capteurs est un dispositif actif qui sert à comparer les trois signaux obtenus d'une manière très fréquente.

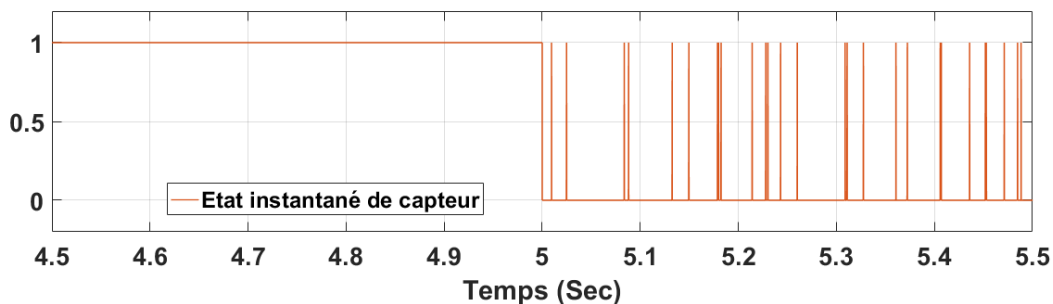


Figure 82. Etat logique d'un capteur de courant rotorique

Malgré le comportement erroné par le capteur dont on a injecté le défaut et qui est illustré dans la Figure 83 (b), le courant rotorique triphasé généré par le modèle FDI semble correct et non affecté par le défaut multiplicatif injecté d'après la Figure 83 (a).

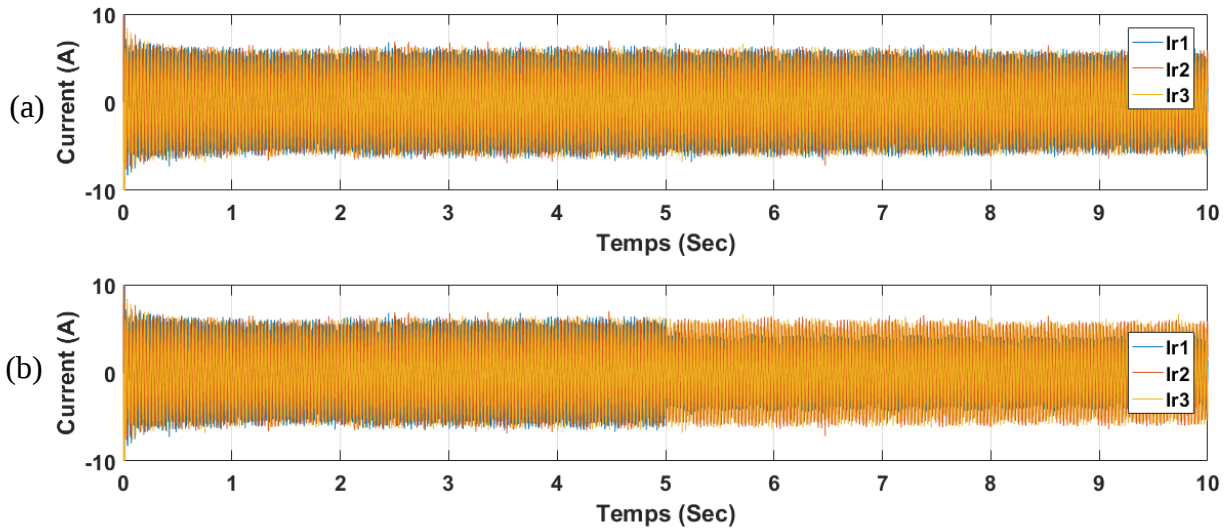


Figure 83. (a) Résultat de mesure sélectionnée par le modèle FDI (b) Résultat de mesure de capteur défectueux

La mission essentielle de commande coté machine est la commande vectorielle des courants de référentiel (d-q). D'après la Figure 84 on voit bien que le défaut injecté à l'instant (5 s) n'a pas déstabilisé la régulation PI des 2 coupants i_d et i_q grâce à l'approche de détection et isolation des défauts des capteurs implémenté dans notre modèle.

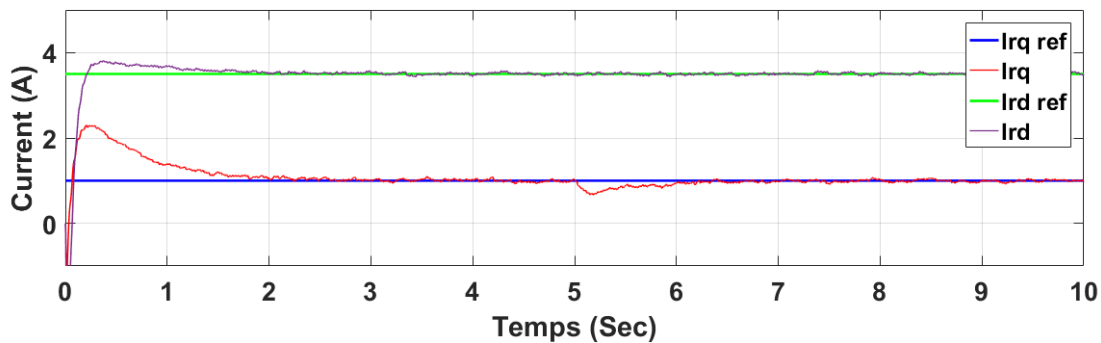


Figure 84 Commande vectorielle avec système FDI

5 Conclusion :

Un système de détection et d'isolation des défauts (FDI) basé sur la redondance des capteurs dans un modèle d'éolienne à base MADA peut offrir une fiabilité et une robustesse accrues en détectant et en isolant les défauts des capteurs de courant et de tension. L'objectif principal d'un tel système est de garantir le fonctionnement sûr et efficace de l'éolienne, même en présence de défauts des capteurs.

Concernant les capteurs de courant et de tension, des défauts peuvent survenir pour diverses raisons telles que le vieillissement, les conditions environnementales, les problèmes électriques ou les dommages physiques. Ces défauts peuvent entraîner des mesures inexactes, ce qui peut avoir un impact sur les performances générales et la stabilité du système d'éolienne. Le système FDI basé sur la redondance aide à atténuer ces problèmes en utilisant des capteurs de secours ou de duplication et en mettant en œuvre des algorithmes appropriés de détection et d'isolation des défauts.

Voici quelques effets et avantages clés d'un système FDI basé sur la redondance dans un modèle d'éolienne DFIG concernant les défauts des capteurs de courant et de tension :

1. Détection des défauts : Le système FDI basé sur la redondance surveille en continu les sorties de plusieurs capteurs mesurant les mêmes paramètres de courant ou de tension. En comparant les mesures des capteurs redondants, le système peut détecter les écarts ou les déviations au-delà des limites acceptables. Ces écarts indiquent des défauts potentiels des capteurs, et le système FDI peut déclencher des actions appropriées.

2. Isolation des défauts : Une fois un défaut détecté, le système FDI basé sur la redondance peut analyser davantage les mesures pour identifier les capteurs défectueux. En isolant les capteurs défectueux, le système peut empêcher leurs lectures erronées d'affecter le contrôle et les mécanismes de protection de l'éolienne.

3. Fiabilité du système : En intégrant la redondance, le système FDI améliore la fiabilité globale du modèle d'éolienne. Il garantit que même si un ou plusieurs capteurs échouent ou fournissent des lectures inexactes, le système peut continuer à fonctionner efficacement et à prendre des décisions éclairées en se basant sur les mesures redondantes disponibles.

4. Tolérance aux défauts : Le système FDI basé sur la redondance améliore la capacité de tolérance aux défauts du modèle d'éolienne. Il peut identifier et atténuer l'impact des défauts des capteurs, réduisant ainsi les risques de fausses alarmes ou d'arrêts imprévus, qui peuvent être coûteux et perturbateurs.

5. Maintenance et diagnostics : Le système FDI peut fournir des informations précieuses pour la maintenance et les diagnostics. En suivant les performances des capteurs et en identifiant les capteurs défectueux, il peut faciliter le process.

Conclusion générale :

En raison des conséquences environnementales considérables provoquées par les combustibles fossiles, l'attention du public et de la communauté scientifique se concentre de plus en plus sur les énergies renouvelables. Les sources d'énergie renouvelable, telles que l'eau, le vent, la géothermie et la biomasse, offrent des alternatives durables qui se renouvellent naturellement sur de courtes périodes. L'utilisation des énergies renouvelables se répand rapidement depuis le début du XXI^e siècle, avec un peu plus de 20% de l'électricité mondiale produite à partir de sources renouvelables. Il devient cependant de plus en plus important d'abandonner toutes ces sources d'énergie fossile qui causent de graves dommages à l'environnement et à la santé publique.

L'énergie éolienne occupe une place remarquable dans la production mondiale d'électricité à partir de sources vertes ces dernières années. L'utilisation de turbines éoliennes basées sur des génératrices asynchrones doublement alimentées est une méthode efficace pour exploiter au maximum la puissance possible, même dans des conditions de vent instables. Cela est rendu possible grâce à une architecture et à des techniques de commande spécialisées qui garantissent un fonctionnement efficace. Le rotor de l'éolienne génère de l'énergie mécanique lorsque le vent fait tourner ses pales, qui est ensuite convertie en énergie électrique à fréquence variable par un générateur asynchrone triphasé. Le courant électrique est dirigé vers le convertisseur côté rotor, qui optimise la tension et le courant pour maximiser la production d'énergie. Le convertisseur côté réseau régule la tension et la fréquence du courant électrique avant de le fournir au réseau électrique. Des systèmes de contrôle en temps réel surveillent et ajustent les paramètres du convertisseur et de l'éolienne pour maximiser l'efficacité de conversion et garantir la stabilité du système. Ainsi, l'éolienne MADA permet un fonctionnement à vitesse variable, un contrôle précis de la production d'énergie et une intégration stable avec le réseau électrique.

La simulation des systèmes réels présente plusieurs avantages. Elle permet une compréhension approfondie du fonctionnement des systèmes, facilite la conception et l'optimisation en évaluant différentes configurations et stratégies, permet l'évaluation des performances dans des conditions réalistes, détecte les erreurs et problèmes potentiels, réduit les risques et les coûts associés à la mise en œuvre réelle, et facilite la formation et l'apprentissage sans risques. En résumé, la simulation des systèmes réels offre une meilleure compréhension, une conception optimisée, une évaluation précise, une détection précoce des problèmes, une réduction des risques et des coûts, ainsi que des opportunités de formation sécurisées.

Le programme MATLAB/Simulink est l'un des outils qui peut être utilisé pour modéliser et simuler le système d'une éolienne à base MADA.

Les défauts des capteurs peuvent survenir dans n'importe quel moment et résulter du mal fonctionnement au système où le capteur est installé, Parlant de système éolien qu'on a traité, les capteurs jouent un rôle crucial dans la transmission des données réelles aux unités de commande ;

Les défauts des capteurs sont généralisés à deux types qui sont les défauts additifs où le capteur défectueux rajoute des valeurs à la mesure résultant un décalage et une incertitude, et les défauts multiplicatifs qui sont les phénomènes où la mesure soit multiplié par un facteur différent de 1.

L'approche de détection et de l'isolation des défauts en utilisant des capteurs redondants a montré son efficacité en compensant les défauts des capteurs de tension V_{dc} et de courant rotorique, ce qui a assuré la robustesse de système en termes de défauts des capteurs. Les simulations effectuées ont illustré les comportements corrects des régulations V_{dc} et i_d/i_q malgré les défauts injectés.

Référence :

- [1] M. A. Hanif, F. Nadeem, R. Tariq, and U. Rashid, *Renewable and Alternative Energy Resources*. Elsevier, 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-818150-8.00019-8.
- [2] “Why renewable energy?,” in *Project Development in the Solar Industry*, 2012, pp. 1–8. Accessed: May 30, 2023. [Online]. Available: <https://resource-solutions.org/why-renewable-energy/>
- [3] “La production de l’électricité et ses émissions de CO2 | Planète Énergies.” <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/production-deelectricite-ses-emissions-co2> (accessed May 30, 2023).
- [4] U. Nations, “What is renewable energy__ United Nations,” *Clim. action*, Accessed: May 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>
- [5] IRENA, “RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2014,” 2014. Accessed: May 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>
- [6] “Découvrez le solaire photovoltaïque et le solaire thermique.” <https://www.atlansun.fr/le-solaire/qu-est-ce-que-c-est> (accessed Jun. 01, 2023).
- [7] S. Abolhosseini, A. Heshmati, and J. Altmann, “A Review of Renewable Energy Supply and Energy Efficiency Technologies,” *SSRN Electron. J.*, no. 8145, 2021, doi: 10.2139/ssrn.2432429.
- [8] “La biomasse agricole,” Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.biomasse-conseil.fr/content/la-biomasse>
- [9] “Les avantages de la biomasse - RAGT Energie.” <https://www.ragt-energie.fr/fr/biomasse/avantages-biomasse.php> (accessed Jun. 01, 2023).
- [10] W. Yang, “Hydropower plants and power systems Dynamic processes and control for stable and efficient operation,” 2017, Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-318470>
- [11] “Les moyens technologiques pour produire de l’électricité | Secondaire | Alloprof.” <https://www.alloprof.qc.ca/fr/elevs/bv/sciences/les-moyens-technologiques-pour-produire-de-l-elec-s1384> (accessed Jun. 02, 2023).
- [12] “Qu’est-ce que l’énergie hydraulique ? | EDF FR.” <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique> (accessed Jun. 02, 2023).
- [13] A. Gaillard, “Système éolien basé sur une MADA : contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service.,” 2010. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/324494619>
- [14] “Les éléments principaux d’une éolienne. | Download Scientific Diagram.” https://www.researchgate.net/figure/4-Les-elements-principaux-dune-eolienne_fig2_337907494 (accessed May 18, 2023).

-
- [15] “4 Constitution des éoliennes [88] 3.5 Transformation de l’énergie... | Download Scientific Diagram.” https://www.researchgate.net/figure/Constitution-des-eoliennes-88-35-Transformation-de-lenergie-eolienne-Lenergie_fig5_338645817 (accessed May 17, 2023).
 - [16] “Électricité : la puissance d’une éolienne | EDF FR.” <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/la-puissance-d-une-eolienne> (accessed May 18, 2023).
 - [17] Olympus, “Inspection de multiplicateurs d’éoliennes Solutions industrielles,” 2022. <https://www.olympus-ims.com/fr/applications/rvi-wind-turbine/> (accessed May 18, 2023).
 - [18] “ABB unveils DFIG for mid-size wind | Recharge.” <https://www.rechargenews.com/wind/abb-unveils-dfig-for-mid-size-wind/1-1-866301> (accessed May 17, 2023).
 - [19] G. Abad, J. López, M. A. Rodríguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. 2011. doi: 10.1002/9781118104965.
 - [20] “Wind Converters, DFIG & FC - Ingeteam #1 Independent Supplier.” https://www.ingeteam.com/en-us/sectors/wind-power-energy/p15_23_250_22/dfig-500-5000.aspx (accessed May 18, 2023).
 - [21] “Generators for wind turbines Standard slip ring generator series for doubly-fed concept Featuring a new innovative slip ring unit (SRU) series,” pp. 1–4.
 - [22] A. A. Tanvir, A. Merabet, and R. Beguenane, “Real-time control of active and reactive power for doubly fed induction generator (DFIG)-based wind energy conversion system,” *Energies*, vol. 8, no. 9, pp. 10389–10408, 2015, doi: 10.3390/en80910389.
 - [23] A. M. Eltamaly, A. I. Alolah, and M. H. Abdel-Rahman, “Modified DFIG control strategy for wind energy applications,” *SPEEDAM 2010 - Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 653–658, 2010, doi: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542208.
 - [24] M. A. Smieeee, A. Garmat, D. Popescu, S. Zidi, and L. Mazouz, “Modeling and control of wind energy conversion system,” *2016 5th Int. Conf. Syst. Control. ICSC 2016*, pp. 377–382, 2016, doi: 10.1109/ICoSC.2016.7507080.
 - [25] “Énergie éolienne : De son gisement à ses aérogénérateurs - Encyclopédie de l’énergie.” <https://www.encyclopedie-energie.org/en/energie-eolienne-de-son-gisement-a-ses-aerogenerateurs/> (accessed May 24, 2023).
 - [26] C. Dufour and J. Bélanger, “A real-time simulator for doubly fed induction generator based wind turbine applications,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 5, no. July, pp. 3597–3603, 2004, doi: 10.1109/PESC.2004.1355112.
 - [27] F. Alrowaie, “Fault Isolation and Alarm Design in Non-linear Stochastic Systems Fault Isolation and Alarm Design in Non-linear Stochastic Systems by Doctor of Philosophy in (Chemical and Biological Engineering) The University of British Columbia (Vancouver),” no. January 2015, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.10342.52801.
 - [28] K. Beddek, A. Merabet, M. Kesraoui, A. A. Tanvir, and R. Beguenane, “Signal-Based Sensor Fault Detection and Isolation for PMSG in Wind Energy Conversion Systems,”
-

IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 66, no. 9, pp. 2403–2412, 2017, doi:
10.1109/TIM.2017.2700138.