

République algérienne démocratique et populaire
Ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A /Mira de Bejaia
Faculté de science et de technologie



جامعة بجاية
Tasdawit n' Bgayet
Université de Béjaïa

Département de génie électrique
Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de master en électrotechnique

Thème

*Intégration de l'énergie hydrolienne dans
un réseau électrique*

Présenté par :

✚ AIDROUS Belkacem
✚ MECHOUCHE Faouzi

Encadré par :

✚ M^r BEKKA. Hakim

Promotion : 2014/2015

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et

la Patience de faire ce travail.

Nos plus vifs remerciements vont à :

*Nôtre promoteur Mr **belkacem.Hakim** d'avoir bien voulu diriger ce travail, Pour*

leur disponibilité, leur franchise, leur aspect sérieux dans le travail et leur

bagage de connaissance qu'elle nous a fait partager.

Aux enseignants qui nous ont suivis tout au long de notre cursus universitaire.

A tous les membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

faouzi/belkacem

Dédicaces

Avec l'aide de dieu tout puissant est enfin achevé ce travail,

Lequel je dédie à toutes les personnes qui me sont chères :

*À la mémoire de ma grand- mère et mon grand père qui m'a orienté vers la lueur du savoir
et de la*

Connaissance depuis mon jeune âge,

Aux témoignages d'affection, d'amour et de Grande reconnaissances, aux

Êtres les plus Chers que j'ai dans ma vie ;

Ma mère, Mon père, Mon frère, Mes sœurs. et Mes amis

Sans oublier mon binôme qui ma aider à faire ce travail.

Un clin d'œil à la bibliothèque centrale

Mes copains de chambre

Lounis, Mohamed, Laid, et grand ami Haouass , SAMI

Mechouche Faouzi

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma grande mère

Ma mère et mon père

Qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude

Et à qui je serai éternellement reconnaissant

À ma chère sœur

À mes frères

*À mon encadreur Monsieur Mr BEKKA HAKIM pour son amabilité et sa
disponibilité*

À tous mes ami(e)s et mes camarades

À la promotion master 2, Electrotechnique, session 2014/2015

À mon binôme

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyenne, du secondaire ou de

L'enseignement supérieur

Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

AIDROUS BELKACEM

BEJAIA, SEPTEMBRE 2015

Sommaire

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des symboles et abréviations	
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités Sur Les Hydroliennes

Introduction	4
I.1 Historique de l'hydrolienne	5
I.2 Utilisation actuelle des hydroliennes	5
I.3 Définition de l'énergie hydrolienne	6
I.4 Conversions de l'énergie hydrolienne.....	6
I.5 Fonctionnement d'une hydrolienne	6
I.6 Comparaison entre l'éolienne et l'hydrolienne	7
I.6.1 Densité de l'eau	7
I.6.2 Vitesse incidente du courant	8
I.6.3 Surface balayée par le rotor	8
I.6.4 Comparaison de la taille d'une éolienne et d'une hydrolienne	8
I.7 Composantes d'une hydrolienne.....	8
I.8 Types d'hydroliennes.....	9
I.8.1 Hydrolienne à axe horizontal.....	9
I.8.1.1 Hammerfest Strom AS.....	10
I.8.1.2 Hydroliennes de type « chaîne »	10
I.8.2 Hydrolienne à axe vertical	11
I.8.2.1 Hydroplane.....	11
I.8.2.2 Hydrolienne à aile oscillante.....	12
I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie hydrolienne.....	13
I.9.1 Avantages de l'énergie hydrolienne.....	13
I.9.2 Inconvénients de l'énergie hydrolienne	14
I.10 Nouvelle Solution	14
I.10.1 Jardins d'Hydroliennes	14
I.11 Maintenance des hydroliennes.....	16
I.12 Modélisation de la Ressource	17
I.12.1 Puissance maximale extraite.....	17

I.12.1.1 Loi de Betz.....	17
I.12.1.2 Limite de Betz.....	19
I.12.2 Potentiel de la ressource.....	19
I.12.3 Modèle de la ressource.....	21
I.13 Influence de différents astres sur les marées terrestres	22
I.13.1 Courants de marée.....	23
I.13.2 Calcul du coefficient de marée.....	23
I.14 Modèle de la machine	23
I.15 Modèles des deux convertisseurs.....	24
I.16 Stratégie de commande	24
I.17 Différents générateurs d'électricité d'une hydrolienne utilisées.....	25
I.17.1 Machine synchrone	25
I.17.2 Dynamo ou génératrice de courant continu	26
I.17.3 Machine asynchrone	26
I.18 Description du Fonctionnement de la MADA	27
I.18.1 Structure de la Machine	27
I.18.2 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA	28
I.19 L'intérêt de la MADA.....	29
I.20 Avantages et inconvénients de la MADA.....	30
I.20.1 Avantages de la MADA.....	30
I.20.2 Inconvénients de la MADA	30
I.21 Accouplement mécanique	30
I.21.1 Attaque directe	31
I.21.2 Attaque indirect.....	31
I.22 Mode de fonctionnement	31
I.22.1 Fonctionnement à vitesse fixe.....	31
I.22.1.1 Avantages.....	32
I.22.1.2 Inconvénients	31
I.22.2 Fonctionnement à vitesse variable	31
I.22.2.1 Avantages.....	31
I.22.2.2 Inconvénient.....	32
Conclusion.....	32

Chapitre II : Modélisation Et Commande D'une Hydrolienne A Base D'une Machine Asynchrone A Double Alimentation

II.1 Introduction	33
II.2 Présentation de système à étudié	33
II.3 Modélisation de la partie mécanique	33
II.3.1 Modélisation de la turbine	33
II.3.2 Modélisation de la transmission	35
II.3.3 Modélisation de l'arbre de transmission.....	35
II.4 Stratégies de commande de la turbine hydrolienne	37
II.5 Point de fonctionnement à puissance maximum MPPT	37
II.5.1 Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.....	37
II.5.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique	39
II.6 Modélisation de la partie électrique.....	40
II.6.1 Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	40
II.7 Modélisation de la MADA	41
II.7.1 Hypothèses simplificatrices.....	41
II.7.2 Modèle de la MADA dans le repère naturel abc	41
II.7.2.1 Equation électriques	42
II.7.2.2 Équations des flux	43
II.7.3 Modèle de la MADA dans le repère de Park.....	44
II.7.3.1 Transformation de Park	44
II.7.3.1.1 Equation électriques	46
II.7.3.1.2 Equation magnétiques.....	46
II.7.3.1.3 Équation de puissance et de couple	47
II.8 Modèle de la MADA en vu de la commande	48
II.8.1 Commande vectorielle.....	48
II.8.2 Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques	50
II.8.3 Relation entre les tensions rotoriques et courants rotoriques	50
II.9 Modélisation des convertisseurs statiques	52
II.9.1 Modélisation de redresseur MLI.....	52
II.9.2 Modélisation du bus continu.....	53
II.9.3 Modélisation du l'onduleur MLI	54
II.10 Commande par Modulation Sinus-Triangle	54
II.11 Contrôle des courants transitant dans le filtre RL	57

Conclusion.....	58
-----------------	----

Chapitre III : Simulation du système globale

Introduction	59
III.1 Schéma structurel	59
III.2 Résultats de la simulation.....	59
III.2.1 Profil de courant marin.....	59
III.2.2 Coefficient de puissance.....	60
III.2.3 Vitesse mécanique de la turbine.....	60
III.2.4 Glissement de la génératrice	61
III.2.5 Puissance active.....	61
III.2.6 Puissance réactive	62
III.2.7 Courants rotorique.....	62
III.2.8 Tension de bus continu.....	63
III.2.9 Couple électromagnétique.....	63
Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	65
Références bibliographiques.....	67
Annexes	

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Les Généralités sur les systèmes hydroliennes

Figure I.1	Schéma globale d'une chaîne d'une conversion hydro-cinétique avec une hydrolienne 7
Figure I.2	Comparaison entre une hydrolienne et une éolienne de même puissance 1MW 8
Figure I.3	Composantes d'une hydrolienne9
Figure I.4	Hydroliennes à axe horizontale10
Figure I.4	hydroliennes de type Hammerfest Strom AS.....10
Figure I.6	Les Hydroliennes de type chaîne.....11
Figure I.7	Hydrolienne à axe vertical.....11
Figure I.8	Structure hydroplane.....12
Figure I.9	Hydrolienne à aile oscillante.....12
Figure I.10	Représentation d'un bassin fermé.....15
Figure I.11	Représentation d'un chenal.....16
Figure I.12	Maintenance d'une hydrolienne à l'aide d'un bateau.....17
Figure I.13	Plongeurs pour la maintenance (gauche) et utilisation de robots (droite)....17
Figure I.14	veine de courant marin à la traversée de l'aéromoteur.....18
Figure I.15	Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un courant de 2 m/s.....20
Figure I.16	Variation temporelle du couple moyen et du couple pulsatoire.....21
Figure I.17	Influences du soleil et de la lune lors des mortes-eaux et des vives-eaux....22
Figure I.18	Schéma électrique des convertisseurs et de la commande.....24
Figure I.19	Machine synchrone.....25
Figure I.20	Coupe d'une génératrice continu-dynamo.....26
Figure I.21	Composants d'une machine asynchrone.....26
Figure I.22	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....27
Figure I.23	Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.....29

Chapitre II : la modélisation et commande d'un système hydrolienne à base d'une machine asynchrone a double alimentation.

Figure II.1	schéma globale d'une chaîne de conversion hydrolienne33
Figure II.2	Caractéristique $C_p(\lambda)$ pour divers valeur de β34
Figure II.3	Schéma de la turbine hydrolienne.....36
Figure II.4	Modèle de l'aérogénérateur36
Figure II.5	Coefficient de puissance C_p en fonction de rapport de vitesse λ38

Figure II.6	schéma du modèle de la MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.....	39
Figure II.7	schéma du modèle de la MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.....	40
Figure II.8	Structure de stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone...	40
Figure II.9	Représentation de la MADA.....	42
Figure II.10	Orientation de l'axe d sur le flux statorique.....	45
Figure II.11	Principe du contrôle vectoriel.....	49
Figure II.12	Schéma bloc de la MADA.....	51
Figure II.13	Schéma du convertisseur liant la MAS au réseau.....	52
Figure II.14	schéma d'un redresseur MLI.....	52
Figure II.15	Schéma électrique filtre passif.....	53
Figure II.16	Schéma d'un onduleur de tension.....	54
Figure II.17	Schéma de principe de la commande MLI.....	56
Figure II.18	Schéma bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink.....	57
Figure II.19	Filtre côté réseau.....	57

Chapitre III : Simulation du système globale

Figure III.1	Schéma structurel de la commande de système hydrolienne globale.....	59
Figure III.2	Allure de la vitesse de courant marin.....	60
Figure III.3	Allure de coefficient de puissance de la turbine.....	60
Figure III.4	La vitesse mécanique de la turbine.....	60
Figure III.5	Allure de glissement de la génératrice.....	61
Figure III.6	Allure de la puissance active.....	61
Figure III.7	Allure de la puissance réactive.....	62
Figure III.8	courants rotorique.....	62
Figure III.9	Zoom sur les courants rotorique.....	63
Figure III.10	Allure de tension du bus continu.....	63
Figure III.11	Allure de couple électromagnétique.....	63

Liste des symboles

P_T	Puissance extraite par la turbine [W]
ρ	Densité volumique du fluide [kg.m^{-3}]
C_p	Coefficient de puissance hydrodynamique de la turbine
S_T	Surface équivalente balayée par les pales de la turbine. [m^2]
V	Vitesse du fluide [m/s]
V_c	Vitesse équivalente de l'écoulement [m/s]
R	Rayon de la turbine hydrolienne [m]
ω_{turbine}	Vitesse angulaire de rotation des pales [rd/s]
(-)	Vitesse spécifique
(-)	Sans unité
ω_{opt}	Rapport de vitesse optimal
	Angle d'orientation des pales [$^\circ$]
C	Coefficient de marée
H	Hauteur de la pleine mer
N	Niveau moyenne de la mer
U	L'unité de hauteur
C_{aer}	Couple aérodynamique de l'hydrolienne [N.m]
g	Couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone [N.m]
t	Couple de la turbine hydrolienne [N.m]
Ω_t	Vitesse de la turbine hydrolienne [rd/s]
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de la génératrice [rd/s]
G	Gain de multiplicateur de vitesse
T_{mec}	Couple mécanique [N.m]
T_{visq}	Couple visqueux [N.m]
J	Inertie total de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine [Kg.m^2]
f	Coefficient de frottement visqueux ramené sur l'arbre rapide [N.m/rad/s]
f_r	Fréquence rotorique [Hz]
f_s	Fréquence statorique [Hz]
V_{sabc}	Vecteur des tensions statorique
I_{sabc}	Vecteur des courants statorique
R_s	Vecteur des résistances statorique
ϕ_{sabc}	Vecteur des flux d'enroulement statorique
V_{rabc}	Vecteur des tensions rotorique

I_{rabc}	Vecteur des courants rotorique
R_r	Vecteur des résistances rotorique
φ_{rabc}	Vecteur des flux d'enroulement rotorique
L_{ss} , L_{rr}	Matrice d'induction statorique et rotorique
M_{rs}	Matrice d'induction mutuelle
L_s et L_r	Inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine [H]
L_s et L_r	Inductances propres statoriques et rotoriques de la machine [H]
M_s et M_r	Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la machine [H]
M_{sr}	Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor [H]
$P(\theta)$	Matrice de la transformation de Park
$P(\theta)^{-1}$	Matrice de la transformation inverse de Park
	L'angle de rotation électrique entre l'axe d de repère diphasée et le repère fixe lie a la phase de stator [Rad]
θ_s	L'angle électrique du champ tournant statorique [Rad]
θ_r	L'angle électrique du champ tournant par rapport au rotor [Rad]
	Pulsation de rotation électrique ($\omega = p \cdot \theta$)
ω_s	Pulsation statorique (imposée par le réseau 50Hz) [rad/s]
ω_r	Pulsation rotorique (influencée par le convertisseur MLI) [rad/s]
ω_m	Pulsation mécanique [rad/s]
l_r	Inductances propre cycliques rotoriques. [H]
l_s	Inductances propre cycliques statorique. [H]
M	Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor. [H]
V_{sq}, V_{rd} et V_{rq}	Tensions statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé [V].
$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$	Courants statorique et rototique directe en quadrature de système diphasé [A].
$\varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système [Wb]
T_{em}	Couple électromagnétique [N.m]
T_r	Couple résistant [N.m]
Ω_r	Vitesse de rotation du rotor de la machine [rd/s]
f	Coefficient de frottement
J	Moment d'inertie de l'ensemble machine et turbine hydrolienne [Kg.m ²]
P	Nombre de paire de pôle de la machine
s	Pulsation électrique des grandeurs statorique [rad/s]
P_s	Puissance active statoriques d'une machine asynchrone [W]

Q_s	Puissance réactive statoriques d'une machine asynchrone [VAR]
g	Glissement de la MADA
V_{dr} et V_{qr}	Composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus [V]
S_a, S_b, S_c	Fonctions logique correspondant à l'état de l'interrupteur

Abréviations

MPPT	Maximum Power Point Traking
MS	Machine Synchrone
MAS	Machine Asynchrone
MAADS	Machine Asynchrone à Double Stator
MSAP	Machine Synchrones à Aimants Permanents
MAC	Machine Asynchrone à Cage
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
V_{ve}	Vives eaux
V_{me}	Morts eaux
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsions.
PI	Action Proportionnelle et Intégrale.

INTRODUCTION GENERALE

L'hydrolien en lui-même n'est pas un concept totalement nouveau mais il représente une des sources d'énergie renouvelable qui a encore besoin d'études exploratoires et d'une réelle finalité pratique.

Les hydroliennes sont des turbines qui récupèrent l'énergie cinétique des courants fluviaux ou marins. Equivalentes quelque part aux éoliennes, elles seront plus compactes à puissance égale car l'eau est mille fois plus dense que l'air. Elles sont aussi plus discrètes si une immersion totale est acceptée. Toutefois, elles ont besoin d'un système d'ancrage (suivant le site qui les accueille), d'une maintenance et d'un acheminement et de gestion de l'énergie électrique assez particuliers.

Pour produire de l'énergie, les hydroliennes auront besoin d'une vitesse de courant supérieure à 1m/s en moyenne. Ainsi des ressources potentielles existent en milieu marin et peut être encore plus en milieu fluvial.

De nos jours, L'énergie électrique des marées est en pleine expansion en tant que partie intégrante du bouquet énergétique dans le monde. Ces dernières années ont vu la recrudescence des projets de recherche dans le secteur des énergies renouvelables. Dès les années 2000 sous l'impulsion des pouvoirs politiques s'amorcent des projets relatifs aux énergies renouvelables ^[1].

Après des études de prospection envisagées suite au premier choc pétrolier de 1973, plusieurs auteurs ont publié de façon détaillée le potentiel de l'énergie des marées par région, ou par pays. Il est cependant à noter que dans ce domaine, aucune technologie de référence n'a encore émergée ^[2]. Les technologies des éoliennes sont encore utilisées compte tenu de leurs similarités, pourtant elles sont différentes. Une étude comparative de l'éolienne et de l'hydrolienne est bien détaillée dans ^[3]. Pour la production de l'énergie électrique à partir de l'hydrolienne, deux types de machines sont généralement utilisés qui sont : la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et la machine synchrone à aimant permanent (MSAP), ces deux types de machines ont été utilisés avec un profil de la vitesse des marées prélevé.

Comme pour les éoliennes, la majorité des hydroliennes utilise le générateur asynchrone à double alimentation ^[4]. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance, car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique. De plus les puissances active et réactive peuvent être contrôlées séparément.

En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi dimensionnement réduit des convertisseurs statiques car ceux-ci sont connectés entre le bobinage rotorique de la MADA et le réseau électrique.

Les hydroliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le courant marin. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'hydrolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie.

On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT en anglais Maximum Power Point Tracking). Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice.

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur. Dans cette optique, nous avons utilisée une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau.

L'objectif principal de nos travaux de thème est d'étudier la technique de commande robuste susceptible d'optimiser la production d'une hydrolienne, en particulier celle utilisant un générateur asynchrone à double alimentation (GADA). Pour ce faire, le thème est organisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, on va donner un aperçu sur les différentes turbines hydroliennes utilisées pour la production d'énergie électrique, on va aussi présentée les deux grandes familles des machines utilisées dans les systèmes de conversion électromécanique, et on finira par la structure de la machine asynchrone à double alimentation, son application et son intérêt. Dans le second chapitre, on va s'intéressera à la modélisation et commande d'un système hydrolienne à base d'une machine asynchrone a double alimentation.

Dans le dernier chapitre, on va élaborer une stratégie de commande, en basant sur le contrôle indépendant des puissances actives et réactives, et on finira ce chapitre avec une simulation pour les différentes méthodes de commande étudiée.

Enfin, nous clôturons ce travail par une conclusion générale qui portera des perspectives pour la continuité de ce travail dans le futur.

Chapitre 1
Généralités sur les
hydroliennes

Introduction

Ce n'est pas par hasard que nous appelons la Terre la planète bleue car les océans couvrent 70 % de sa surface. Tous ces océans sont riches en flux énergétiques, qui proviennent à la fois de l'énergie du soleil (à l'origine des vents, de la houle, des grands courants marins, des différences de température de la mer), En fonction de la région dans laquelle on se trouve, on reçoit plus ou moins d'énergie solaire. Ainsi, les zones tropicales en reçoivent beaucoup plus que les zones polaires. Pour rééquilibrer l'ensemble, les océans et l'atmosphère vont se mettre en mouvement, créant ainsi les courants, également influencés par la rotation de la Terre sur elle-même. Ces courants sont appelés « courants océaniques ». Il existe également des « courants de marée », provoqués par les variations du niveau de la mer dues à la gravitation de la Terre, de la Lune et du Soleil. Ces flux peuvent être exploités sous diverses formes, énergie des marées, énergie des vagues, énergie des courants, énergie thermique des mers, énergie osmotique, biomasse marine.

Toutes ces énergies vont permettre de produire de l'électricité. Les exploiter permet donc de diversifier le bouquet énergétique, et ainsi de réduire la part d'énergies fossiles dans la consommation d'énergie globale, et donc de diminuer nos émissions de gaz à effet de serre ^[5].

Pour exploiter l'énergie cinétique des courants de marins on fait appel à des machines hydroliennes, cette énergie cinétique va être transformée en énergie électrique via un alternateur. Constituée de grandes hélices, l'hydrolienne peut être placée horizontalement ou verticalement sous l'eau (fixée sur le fond de la mer par 20 ou 40 m de fond ou suspendue à une structure flottante), entre deux eaux ou encore à la surface. Si les courants marins sont 4 à 5 fois moins rapides que le vent, la puissance électrique d'une hydrolienne est beaucoup plus importante que celle des éoliennes de même dimension, car la densité de l'eau de mer est 800 fois plus élevée que celle de l'air. Les hydroliennes sont donc nettement moins imposantes que les éoliennes terrestres.

Les zones propices sont celles où la vitesse des courants est supérieure à 1 m/s et la profondeur d'eau supérieure à 20 m pour que la machine puisse avoir une puissance suffisante. Dans un contexte de demande croissante et de raréfaction des combustibles fossiles, où le terrestre ne peut plus répondre à tous nos besoins, l'exploitation des énergies marines semble une voie prometteuse. Le milieu marin étant particulièrement difficile, cette technologie n'en est aujourd'hui qu'à un stade expérimental.

I.1 Historique de l'hydrolienne

La houle et les vagues constituent une source d'énergie dont la récupération occupe l'esprit de l'homme depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Dans l'ouvrage de A.Berget de 1923 intitulé "Vagues et marées", on peut déjà trouver quelques dispositifs proposés pour récupérer l'énergie mécanique représentée par le mouvement des vagues. Un premier engin, qui n'avait pas la forme du prototype final, fut testé dans le port de Doélan, en Bretagne, au printemps 1979 avec un prototype dont le rotor avait une aire de 7 m². La hauteur de la houle étant de 80 centimètres, les expérimentateurs récupérèrent une puissance de 3 kW.

La première hydrolienne commerciale a été implantée en Irlande du Nord (1,2 MW) en avril 2008. De nombreux autres projets sont en développement aujourd'hui, notamment en France et au Royaume-Uni, qui rassemblent 80 % du potentiel européen. La technique utilisée est relativement connue (proche d'une éolienne), son développement ne devrait donc requérir que du progrès technologique incrémental ^[6].

I.2 L'utilisation actuelle des hydroliennes

Les éoliennes ont un grand succès car la vitesse du vent est suffisante sur de nombreux sites pour justifier des éoliennes compétitives de 1 à 5 MW à terre, de 2 à 10 MW en mer. Ce succès a encouragé une production d'énergie en mer avec des équipements similaires (hydroliennes) en utilisant les courants marins là où ils sont les plus importants, c'est-à-dire généralement près des zones à fort marnage.

La puissance fournie par une hydrolienne est à peu près égale (en kW) à $0,2.S.V^3$, S étant la surface des turbines et V la vitesse du courant. Le diamètre de turbine peut être de 10 à 20 m. Pour 16 m de diamètre, la puissance (kW) est proche de $40.V^3$, Avec 3 m/s on produit donc 1 MW, avec 2 m/s on a 300 kW, avec 1 m/s on a 40 kW. Même avec 3 m/s, une rangée d'hydroliennes ne prélève qu'une faible partie de l'énergie du courant, correspondant à une chute de l'ordre de 0,1 m. Et il existe assez peu de sites mondiaux importants où la vitesse du courant dépasse 3 m/s et 2 m/s et la puissance unitaire sera voisine de 0,5 à 1 MW. Le coût d'installation, de raccordement électrique et d'entretien est généralement élevé dans ces zones et la production annuelle proche de 2.000 heures de la puissance installée. La production est très faible une semaine sur deux.

Le potentiel serait semblable pour les éoliennes terrestres si on ne trouvait de vents favorables que sur des reliefs au-dessus de 3.000 m.

Les hydroliennes sur des sites naturels ont un potentiel théorique important mais le potentiel mondial utilisable à un coût acceptable n'est probablement que de l'ordre de 100 TWh/an. Les hydroliennes sont donc un outil de fabrication très économique dont les conditions naturelles d'utilisation sont très coûteuses. Elles pourraient être très rentables si elles pouvaient opérer la majeure partie du temps à une vitesse de 3 ou 4 m/s dans des conditions marines favorables. Il n'y a pas de tels sites naturels ^[7].

I.3 Définition de l'énergie hydrolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé hydrolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du courant marin en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

I.4 Conversions de l'énergie hydrolienne

Une hydrolienne est une turbine sous-marine qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou de cours d'eau, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air. Cet énergie est transformée en énergie mécanique qui, elle est transformée en énergie électrique. Il existe plusieurs sortes d'hydroliennes, certaines sont totalement sous l'eau, d'autres à la surface de l'eau.

I.5 Fonctionnement d'une hydrolienne

Le principe de fonctionnement d'une hydrolienne est simple on place des hélices ou des turbines dans l'axe des courants des marées pour capter l'énergie que ces dernières peuvent fournir. Le courant va faire tourner l'hélice de l'hydrolienne qui va transformer l'énergie mécanique en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette électricité est ensuite acheminée par des câbles reliés au rivage jusqu'à différents points de distribution ^[8].

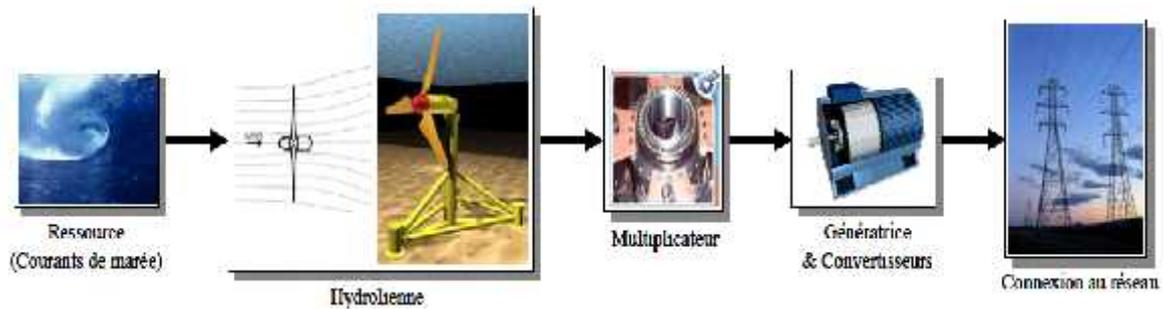


Figure I.1 Schéma globale d'une chaîne de conversion hydro-cinétique avec une hydrolienne.

I.6 Comparaison entre l'éolienne et l'hydrolienne

La puissance extraite par l'hydrolienne est proportionnelle à la surface balayée par le rotor, à la masse volumique de l'eau et grossièrement, au cube de la vitesse du courant incident. Pour évaluer la puissance disponible, une comparaison avec les éoliennes s'impose.

I.6.1 Densité de l'eau

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Plus l'eau est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'hydrolienne est importante. À une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'eau pèse environ 1000 kg par mètre cube. Cependant, la masse volumique peut varier en fonction de la température, de la salinité et de la teneur en sédiments (mais avec des variations négligeables pour les phénomènes qui nous intéressent ici). Dans les mêmes conditions de température et de pression, la masse volumique de l'air est de 1,225 kg par mètre cube, c'est-à-dire environ 800 fois inférieure à celle de l'eau.

I.6.2 Vitesse incidente du courant

Les projets actuels prévoient d'exploiter des zones où le courant possède une vitesse moyenne comprise entre 1,8 et 3,5 m/s contre environ 15 m/s pour la vitesse optimale pour la plupart des éoliennes.

I.6.3 Surface balayée par le rotor

Les projets actuels d'hydroliennes prévoient des pales de 15 m de diamètre alors que les éoliennes ont couramment des diamètres d'environ 50 m. Les infrastructures sont alors de taille beaucoup plus réduite.

Les deux structures sont des capteurs d'énergie cinétique. La puissance extraite par la turbine s'exprime dans les deux cas comme dans l'équation (I.1).

$$P_T = 0.5 \cdot \rho \cdot C_P \cdot S_T \cdot V^3 \quad (I.1)$$

Où P_T est la puissance extraite par la turbine, ρ est la densité volumique du fluide (kg/m³), C_P est le coefficient de puissance hydrodynamique de la turbine (limité à 59% par la loi de Betz, S_T (m²) est la surface équivalente balayée par les pales de la turbine.

Où V est la vitesse du fluide (m).

On peut remarquer que c'est surtout la différence de masse volumique entre l'eau et l'air qui explique les différences de dimension entre les deux objets.

I.6.4 Comparaison de la taille d'une éolienne et d'une hydrolienne

Une hydrolienne peut être plus petite qu'une éolienne et cette comparaison dépend surtout du courant. Pour une puissance demandée de 1MW, on a la comparaison de taille d'une éolienne et hydrolienne comme le montre la Figure I.2 :



Figure I.2 Comparaison entre une hydrolienne et une éolienne de même puissance 1MW.

I.7 Composantes d'une hydrolienne

- **Rotor** : c'est le système, qui, entraîné par les pâles qui tournent grâce à la force des courants, va fournir l'énergie mécanique. Il est relié à plusieurs pâles (on peut en avoir de deux à dix). Ce rotor fonctionne grâce à la houle. Il a été développé de

manière à ce qu'il tourne toujours dans le même sens, que la houle ait tendance à le soulever ou à le rabaisser.

- **Stabilisateur** : c'est le mécanisme qui permet aux pâles de toujours être en opposition pour que l'hydrolienne soit en rotation par rapport au sens du courant.
- **L'alternateur** : il s'agit d'un générateur électrique, qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Mat** : il supporte la nacelle et le rotor de la turbine.
- **Multiplicateur de vitesse** : Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- **Nacelle** : qui regroupe tout les parties mécaniques permettant de coupler le rotor hydrolienne au générateur électrique : arbre, multiplicateur, roulement, et le frein à disque qui permet d'arrêter en cas de surcharge, le système hydraulique, système de refroidissement, le générateur qui est généralement une machine asynchrone ou synchrone et les systèmes d'orientation des pales et de la nacelle ^[9].

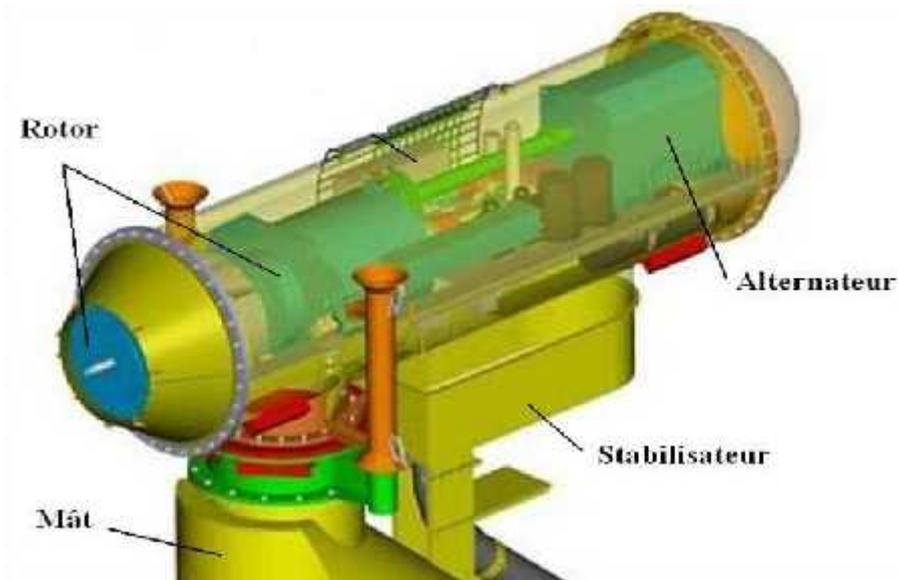


Figure I.3 Composantes d'une hydrolienne.

I.8 Types d'hydroliennes

Les principaux types d'hydrolienne sont :

I.8.1 Hydrolienne à axe horizontal

Ce sont les hydroliennes les plus utilisées, elles sont fixées au sol marin par un socle. Celles-ci peuvent contenir jusqu'à 4 hélices. Elles possèdent souvent une partie hors de

l'eau, pour la maintenance. La plus grosse hydrolienne au monde, Seagen, entre dans cette catégorie.

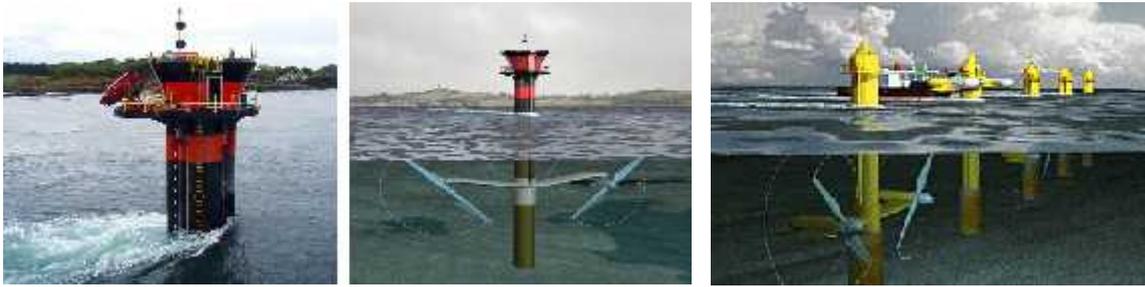


Figure I.4 Hydroliennes à axe horizontale.

I.8.1.1 Hammerfest Strom AS

Il s'agit d'un pieu tripode long de 20 m fixé par gravité au fond de la mer sur lequel est fixé un rotor à 3 pales de 10 m de long. Ces pales sont en matériaux composites renforcés par de la fibre de verre afin d'allier résistance et hydrodynamique. Cette hydrolienne est équipée d'un générateur conventionnel d'une puissance voisine de 600 kW par machine.



Figure I.5 hydroliennes de type Hammerfest Strom AS.

I.8.1.2 Hydroliennes de type « chaîne »

Ce sont des enchaînements d'hélices placés sur les fonds marins. Elles ne gênent donc pas la navigation mais elles peuvent recouvrir une grande surface de fonds. Elles sont souvent placées près des côtes ou à l'embouchure des fleuves.

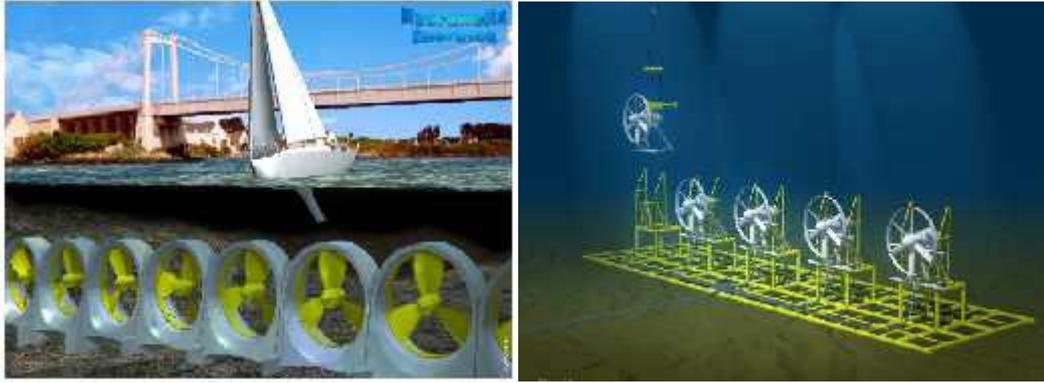


Figure I.6 Les Hydroliennes de type chaîne.

I.8.2 Hydrolienne à axe vertical

Ce prototype est constitué d'une plate-forme flottante ancrée en 4 points reliée à une génératrice synchrone triphasée. Les 3 pales en acier sont recouvertes de résine de carbone et sont portées chacune par 2 bras radiaux en fibre de verre. La puissance obtenue est de 120 kW pour un courant de 3,5 m.s⁻¹, ce qui correspond à un rendement d'environ 23%.

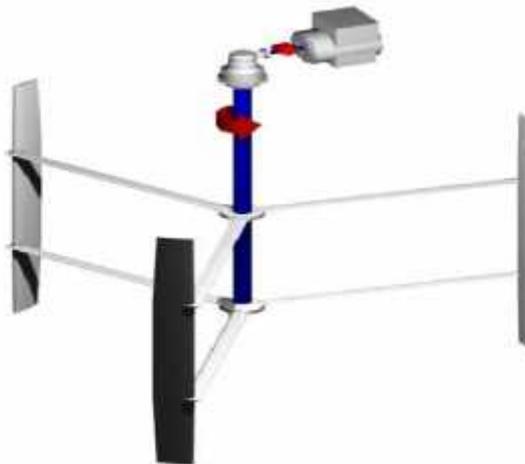


Figure I.7 Hydrolienne à axe vertical.

I.8.2.1 Hydroplane

La structure porteuse – d'une hauteur d'environ 20 m – est un trépied fixé sur le fond océanique par gravité. L'hydroplane fait face au courant mais son angle d'attaque est variable, l'amplitude maximale étant d'environ 50°. Les oscillations du bras entraînent le pompage du fluide qui alimente un moteur hydraulique couplé à un générateur électrique. On estime la puissance dégagée à 150 kW, soit un rendement de 20%.

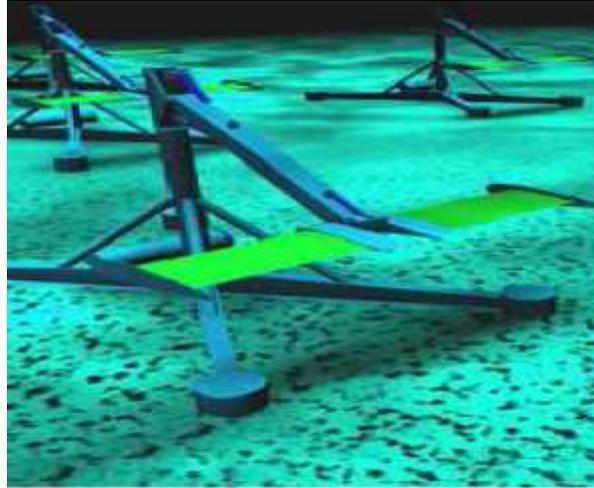


Figure I.8 Structure hydroplane.

I.8.2.2 Hydrolienne à aile oscillante

Imite le battement de la nageoire d'un poisson. Une pale est attachée à un bras qui monte et descend sous la poussée de l'eau. Le mouvement actionne une génératrice qui sert à produire de l'électricité.



Figure I.9 Hydrolienne à aile oscillante.

Il existe d'autres types d'hydroliennes moins utilisées comme :

- Une hydrolienne transverse en mouvement, souvent comparée à un batteur d'œuf
- Une hydrolienne à turbines libres
- L'hydrolienne de type « rideau »



I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie hydrolienne

Comme toutes technologies, l'hydrolienne a des avantages et également des inconvénients, qu'il faut étudier, afin qu'ils ne deviennent pas un frein à son développement.

I.9.1 Avantages de l'énergie hydrolienne

- Elles exploitent l'énergie marémotrice, qui est une source d'énergie naturelle, non polluante et gratuite. Mais surtout inépuisable et continue (les courants marins sont toujours présents en mer contrairement aux vents sur terre, pour les éoliennes).
- Les courants marins sont prévisibles, on peut donc estimer avec précision la production d'électricité
- elles ont un impact minimal sur la vie marine, la forme du rotor est étudiée pour ne présenter aucun danger, les pales possèdent des bords arrondis et donc non coupants. Les hélices ne sont donc pas dangereuses car elles tournent à un rythme de dix à quinze tours par minute, soit dix fois moins vite que celles d'un bateau (ce qui limite les turbulences et ne perturberait pas les animaux) et enfin, ne rejettent aucun déchets.
- Grâce à la rotation des hydroliennes, cela empêche un dépôt de sédiment sur les dispositifs ainsi que sont évasement, l'entretien peut donc être fait moins souvent, étant donné que celles-ci sont difficile d'accès et à entretenir. De plus, son espace nécessaire est réduit.
- Malgré leurs tailles inférieures aux éoliennes, elles fournissent une puissance électrique égale voir supérieure car la masse volumique de l'eau est huit-cent fois supérieures à la masse volumique de l'air.

- Elles ne provoquent pas de gênes sonores (elles sont donc silencieuses au fond de l'eau et inaudibles en surface) et ne sont, la plupart du temps, invisible hors de la l'eau et ne nuisent pas aux paysages.

I.9.2 Inconvénients de l'énergie hydrolienne

- La corrosion : le principal problème est causé par la corrosion de l'eau de mer. La rouille et la corrosion des matériaux composant l'hydrolienne ne permettent presque pas leur récupération et leur réutilisation après la fin de leur vie.
- L'hydrolienne doit résister à des conditions environnementales très dures (puissance des courants, sable en suspension...) La maintenance pose problème car l'accès aux champs d'hydroliennes peut être difficile, le personnel doit être formé spécialement pour la maintenance en mer. De plus, certains types d'hydroliennes ne possèdent pas de système leur permettant de remonter en surface, la maintenance doit alors être effectuée sous l'eau par des plongeurs.
- l'entretien doit être très fréquent mais il est plus difficile qu'à l'air libre puisqu'on ne peut pas l'ouvrir sans que l'eau ne pénètre à l'intérieur et n'endommage tout le système (mécanique et électrique), Pour cette raison, certaines hydroliennes ont une structure émergeant de l'eau, qui peut être gênante pour la navigation.
- Le financement de tous ces projets est également un réel problème. Le cout d'installation d'une hydrolienne est de 3,8 millions d'euro pour chaque méga watt installée, soit près d'un million de plus que pour l'éolienne. Des études ont montré que ces hydroliennes serait très vite rentabiliser (4ans pour certaines).
- Les hydroliennes créent des zones de turbulences, ainsi les végétaux ne peuvent pas se développer correctement. D'ou nuisance pour la faune marine.

I.10 Nouvelle Solution

I.10.1 Jardins d'Hydroliennes

Les éoliennes ont un grand succès car la vitesse du vent est suffisante sur de nombreux sites pour justifier des éoliennes compétitives de 1 à 5 MW à terre, de 2 à 10 MW en mer. Ce succès a encouragé une production d'énergie en mer avec des équipements similaires (hydroliennes) en utilisant les courants marins là où ils sont les plus importants, c'est-à-dire près des zones à fort marnage.

Le coût de fabrication des hydroliennes est très compétitif mais les sites naturels où la vitesse du courant est suffisante sont très rares et d'accès difficile. Une nouvelle solution est basée sur des sites artificiels très favorables à leur utilisation. On peut chercher à créer des sites permettant leur utilisation dans les meilleures conditions. Des digues peuvent créer de grands bassins adossés à la côte et ouverts sur la mer par des chenaux où sont placés de nombreuses hydroliennes : celles-ci opèrent dans des conditions optimales de vitesse du courant, et de facilités d'installation, d'exploitation et d'entretien, donc à un coût très compétitif. Le but essentiel est d'opérer dans un courant de vitesse à peu près constante de 3,5 à 4 m/s, pour de fortes ou faibles marées et pour les différents niveaux de la mer.

La meilleure solution semble la création le long du littoral de grands bassins fermés par une digue au lieu d'y placer des usines de larges ouvertures alimentent des chenaux perpendiculaires à la digue dans lesquels sont placés des rangées d'hydroliennes (fig.10 et 11). Ces chenaux d'une longueur de 1 à 2 km sont bordés par des digues à faible charge et peuvent être fermés côté mer par des vannes semblables aux vannes de barrages sur les grands fleuves .Le fond du chenal peut être bétonné sur 0,50 km.

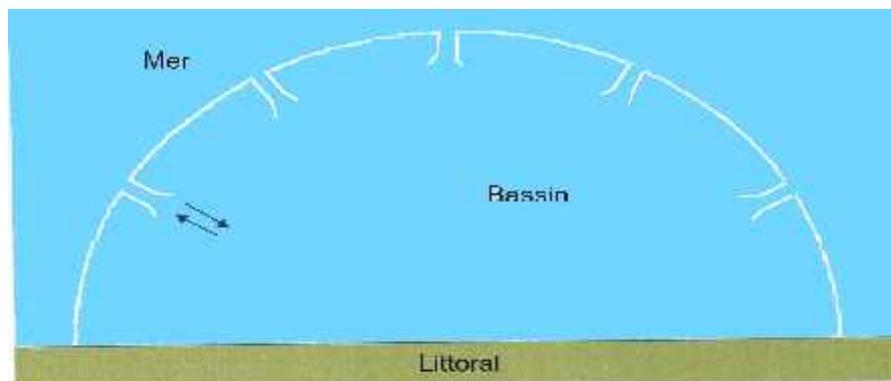


Figure. I.10 Représentation d'un bassin fermé.

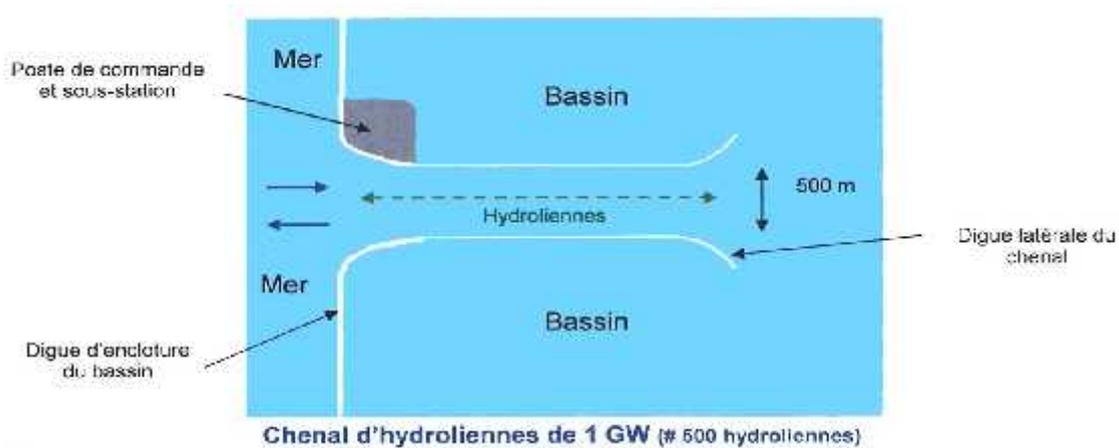


Figure I.11 Représentation d'un chenal.

Cette solution est rentable même avec un marnage de 3 m et peut donc s'appliquer à l'essentiel du potentiel mondial.

Cette utilisation spécifique justifie un nom spécifique : **les Maréliennes**^[10].

I.11 Maintenance des hydroliennes

Les principales opérations de maintenance à réaliser sont de plusieurs types. Tout d'abord, il est nécessaire de changer les composants. Pour cela, il faut donc que la construction soit durable. Il faut aussi réaliser des opérations de nettoyage et, de ce fait, il est nécessaire de choisir le design optimal et de trouver les lieux appropriés. Il faut parfois aussi changer les matériaux de consommation.

La maintenance et la réparation des hydroliennes nécessitent l'utilisation de bateaux et sont, de ce fait, difficiles et dangereuses. Cependant, quelques changements au niveau du design pourraient être pris pour réduire la difficulté et la fréquence des procédés de maintenance. Une installation levant l'unité de la turbine au dessus de l'eau permet, par exemple, de faire la maintenance sur une plateforme ou un bateau. Tous les composants importants de la turbine peuvent ainsi être apportés à l'intérieur du bateau Figure 12.

La maintenance se fait autrement à l'aide de robots spéciaux ou avec des plongeurs qui changent les câbles et assurent la maintenance des fondations Figure 13.

Par ailleurs, il faut utiliser des lubrifiants avec une viscosité très importante, des joints de haute qualité, des coussinets et des hélices suffisamment forts pour réduire la fréquence de la maintenance.



Figure I.12 Maintenance d'une hydrolienne à l'aide d'un bateau.



Figure I. 13 Plongeurs pour la maintenance (gauche) et utilisation de robots (droite).

I.12 Modélisation de la Ressource

I.12.1 Puissance maximale extraite

I.12.1.1 Loi de Betz

Grâce à la loi de Betz, on peut déterminer le rendement maximal des hydroliennes. En faisant des bilans de puissance entre ce qui arrive vers le rotor et ce qui en repart, on trouve, en respectant les notations de la figure 14, une puissance extraite qui s'exprime :

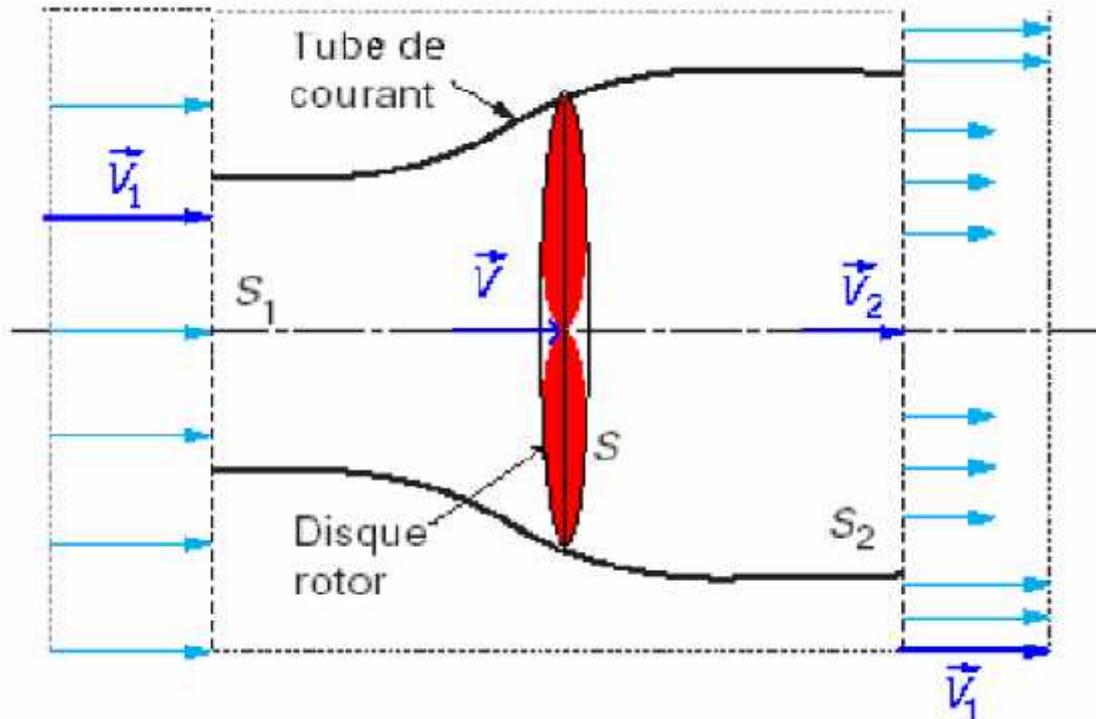


Figure I.14 veine de courant marin à la traversée de l'aéromoteur.

- Avec
- V_1 vitesse axiale initiale du courant marin
 - S_1 surface à l'entrée du tube de courant
 - V vitesse de courant marin dans le plan du rotor
 - S surface du rotor
 - V_2 vitesse de courant marin à l'aval du rotor
 - S_2 surface à l'aval du rotor

On supposera l'air incompressible, ce que permettra d'écrire la conservation du débit volumique :

$$S_0 \cdot V_0 = S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 \quad (I.2)$$

Le théorème d'Euler (variation de la quantité de mouvement de la veine de courant marin entre l'amont et l'aval de l'hélice) permet d'écrire que la force F s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur est donnée par l'expression :

$$F = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot (V_0 - V_2) \quad (I.3)$$

On obtient ainsi l'expression de la puissance mécanique fourni à l'aéromoteur :

$$P = F \cdot V_1 = \rho \cdot S_1 \cdot V_1^2 \cdot (V_0 - V_2) \quad (I.4)$$

De plus, la masse d'air élémentaire dm traversant l'hydrolienne pendant le temps dt est :

$$dm = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot dt \quad (I.5)$$

La variation d'énergie cinétique de cette masse dm lorsque la vitesse passe de la valeur V_0 à la valeur V_2 est définie par :

$$dW_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot (V_0^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

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

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot (V_0^2 - V_2^2) \quad (I.7)$$

En exprimant que $P_c = P$, on en déduit que :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \quad (I.8)$$

Ainsi la puissance récupérable selon la théorie de Betz s'énonce :

$$P_t = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S_1 \cdot (V_0 + V_2)^2 \cdot (V_0 - V_2) \quad (I.9)$$

I.12.1.2 Limite de Betz

La relation devant exister entre V_0 et V_2 pour que cette puissance P_t passe par un maximum est :

$$\frac{dP_t}{dV_2} = 0 \quad \text{soit } V_0 = 3V_2 \quad (I.10)$$

Dans ces conditions la puissance maximale s'écrit :

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho \cdot S \cdot V_0^3 = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^3 \quad (I.11)$$

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_v \quad (I.12)$$

Ce que signifie que la puissance maximale récupérable ne pourra jamais représenter plus de $\frac{16}{27} \times 100 = 59,26\%$ De la puissance disponible due au courant marin, c'est la limite de Betz [13].

Cette valeur maximale de CP est appelée **limite de Betz**, il s'agit d'un maximum théorique, en pratique, les turbines conçues ces dernières années ont une valeur de C_p comprise entre 0.4 et 0.5.

I.12.2 Potentiel de la ressource

La puissance cinétique totale disponible sur la turbine d'une l'hydrolienne est donnée par la relation (I.13)

$$P_T = 0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_{marée}^3 \quad (I.13)$$

Cependant, seule une partie de l'énergie disponible peut être captée par l'hydrolienne (I.14) d'après la théorie de Betz,

$$P_{hyd} = 0.5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V_{marée}^3 \quad (I.14)$$

Il est à noter que les expressions (I.13) et (I.14) sont valables pour tout système qui extrait l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement (éoliennes et hydroliennes).

Avec C_p : coefficient de puissance de l'hydrolienne

$V_{marée}$: La vitesse du fluide (m).

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement hydrodynamique de la turbine. On définit le coefficient de vitesse relative comme un rapport entre la vitesse périphérique au bout de l'hélice et la vitesse instantanée de courant de marin des pales :

$$\lambda = (\omega_{(turbine)} \cdot R) / Vc \tag{I.14}$$

Avec ω (-) est la vitesse spécifique, R (m) le rayon de la turbine, Vc (m/s) la vitesse équivalente de l'écoulement et $\omega_{(turbine)}$ (rad/s) la vitesse de rotation de la turbine.

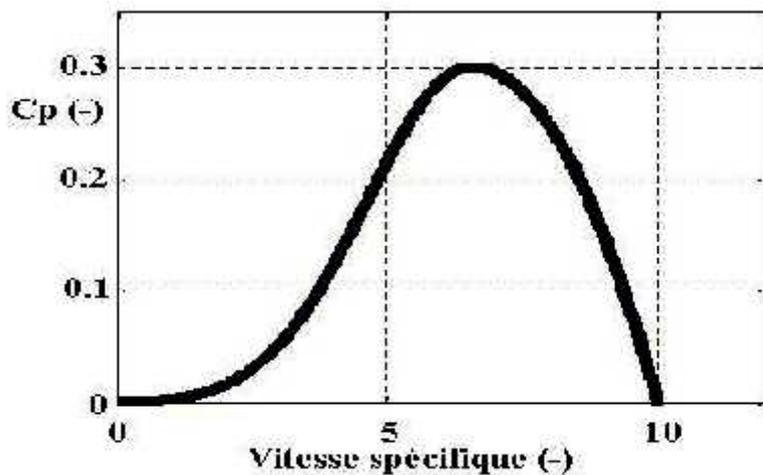


Figure I.15 Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un courant de 2 m/s [11].

Le point de départ de cette modélisation est la représentation de la puissance extractible P_{hdr} en fonction de la vitesse incidente du courant d'eau et des conditions de fonctionnement et donné par la relation (I.14)

$$P_T = 0.5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot S_T \cdot V^3 \tag{I.15}$$

Ce modèle ne prend pas en compte de manière exhaustive l'ensemble des phénomènes hydrodynamiques spécifiques à une turbine hydrolienne. Le couple hydrolienne à l'arbre de la turbine C_T est ainsi déterminé : voir la relation (I.16).

$$C_T = P_T / \omega_{(turbine)} \tag{I.16}$$

La Figure I.16 présente le couple moyen et du couple pulsatoire qui se superpose [12].

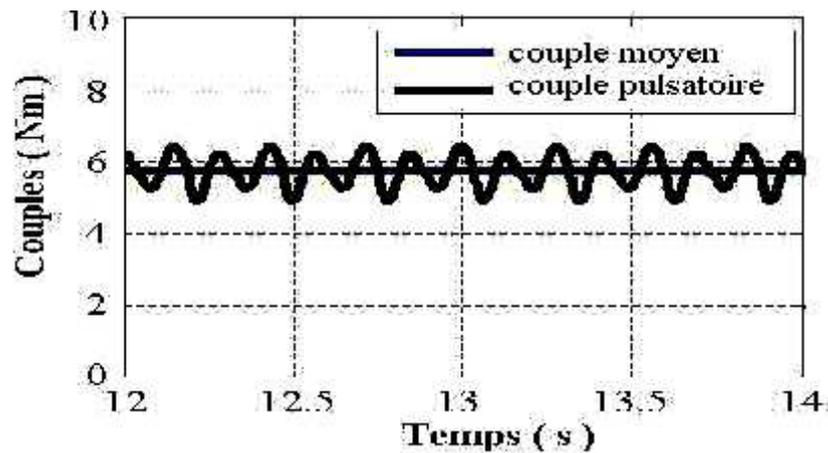


Figure I.16 Variation temporelle du couple moyen et du couple pulsatoire.

I.12.3 Modèle de la ressource

La modélisation de la ressource nécessite la connaissance d'un certain nombre de données liées au site ciblé pour l'installation de l'hydrolienne (courant, bathymétrie, nature du fond). Connaissant le coefficient de marée, il est possible d'extrapoler la valeur du courant pour une heure donnée à partir du modèle du premier ordre suivant la relation (I.17)

$$V_{marée} = V_{me} + C - 45 (V_{ve} - V_{me}) / (95 - 45) \quad (I.17)$$

Où 95 et 45 sont respectivement les coefficients de marée moyens correspondant aux vives eaux et mortes eaux. Cependant, les coefficients C , V_{ve} (vives eaux) et V_{me} (morts eaux) sont des données liées au site ciblé pour l'installation de l'hydrolienne.

I.13 Influence de différents astres sur les marées terrestres

Le phénomène des marées se déroule de la façon suivante. La Lune, proche de la Terre, exerce sur les masses d'eau une force attractive suffisamment forte pour les "déplacer". Lorsque la Lune se situe à la verticale d'un point de la surface océanique, les masses d'eau se gonflent : c'est ce qu'on appelle la **pleine mer**. Le même phénomène produit au même instant aux antipodes. A l'inverse, c'est la **basse mer** pour tous les lieux où l'on voit la Lune à l'horizon. ^[13].

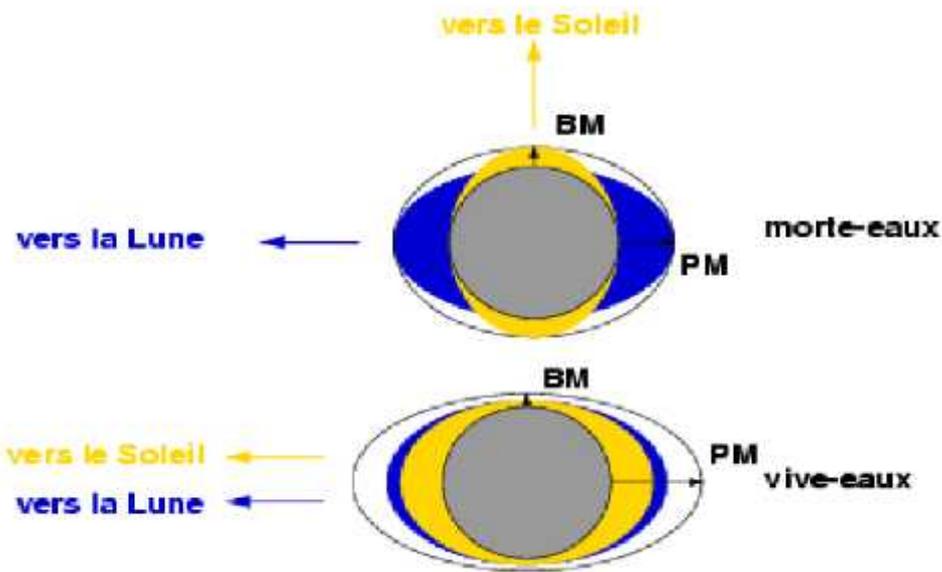


Figure I.17 Influences du soleil et de la lune lors des mortes-eaux et des vives-eaux.

L'action du Soleil se limite, à cause de sa position éloignée de la Terre, à renforcer ou s'opposer aux effets de la Lune. Lorsque ces astres sont **en quadrature**, perpendiculaires par rapport à la Terre, leurs influences se contrarient : ce sont les **mortes-eaux**. Au contraire, lorsque les trois axes sont alignés, phénomène de **syzygie**, le Soleil accentue l'effet de la Lune : c'est l'époque des **grandes marées** ou **vives eaux**.

Par conséquent, cette combinaison linéaire des marées lunaires et des marées solaire explique le phénomène d'alternance des marées de forte amplitude (vive-eau) et de faible Amplitude (morte-eau) toutes les semaines environ.

➤ Mortes-eaux

Les mortes-eaux correspondent à l'état de la mer en période de coefficient de marée inférieur à 70, par opposition aux vives-eaux. En période de mortes-eaux, le marnage est minimal (la mer recouvre et découvre moins), les courants sont moins forts, et les poissons, plus craintifs, sont aussi plus difficiles à pêcher à l'hameçon.

➤ Vives-eaux

Les vives-eaux correspondent à l'état de la mer en période de coefficient de marée supérieur à 70, par opposition aux mortes-eaux. En période de vives-eaux le marnage est maximal (la mer recouvre et découvre plus), les courants sont plus forts, et les poissons, moins craintifs, sont aussi plus faciles à pêcher à l'hameçon.

I.13.1 Courants de marée

Générés par le phénomène des marées, les courants de marée apparaissent en fonction du déplacement des eaux.

Les courants de marée sont périodiques grâce à la périodicité des marées, et ils se manifestent différemment au large et près des côtes. Au large, ils sont giratoires et font le tour de l'horizon pendant une marée complète. Ils tournent, sous l'influence de la force de Coriolis, vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud ^[14].

I.13.2 Calcul du coefficient de marée

Le coefficient de marée est calculé pour une pleine mer. On le calcule en faisant le quotient marnage semi-diurne, par la valeur moyenne du marnage pour les marées de vive-eau d'équinoxe.

Sa formule est donnée par la relation suivant :

$$C = \frac{H - N}{U}$$

Ou H= la hauteur de la pleine mer

N= le niveau moyenne de la mer

U= l'unité de hauteur

L'unité de hauteur correspond à la valeur moyenne de l'amplitude de la plus grande marée qui sui d'un jour et demi environ l'instant de la pleine ou de la nouvelle lune, lors de l'équinoxe. Il s'agit de la valeur moyenne du marnage pour la marée de vive-eau d'équinoxe.

Le résultat du coefficient de marée est un nombre sans dimension compris entre 20 et 120.

I.14 Modèle de la machine

Le modèle de la génératrice choisi pour la synthèse de la commande est un modèle vectoriel dans un référentiel tournant (Park). L'utilisation d'une représentation vectorielle des grandeurs électriques est une manière d'obtenir un modèle invariant. Cette représentation présente l'avantage de permettre la manipulation des grandeurs continues plutôt qu'alternatives.

I.15 Modèles des deux convertisseurs

Les modèles des convertisseurs doivent être adaptés à une étude en simulation et aussi à la mise en œuvre des commandes. Ainsi les deux onduleurs de tension sont représentés par un modèle moyen dans un référentiel de Park (d q).

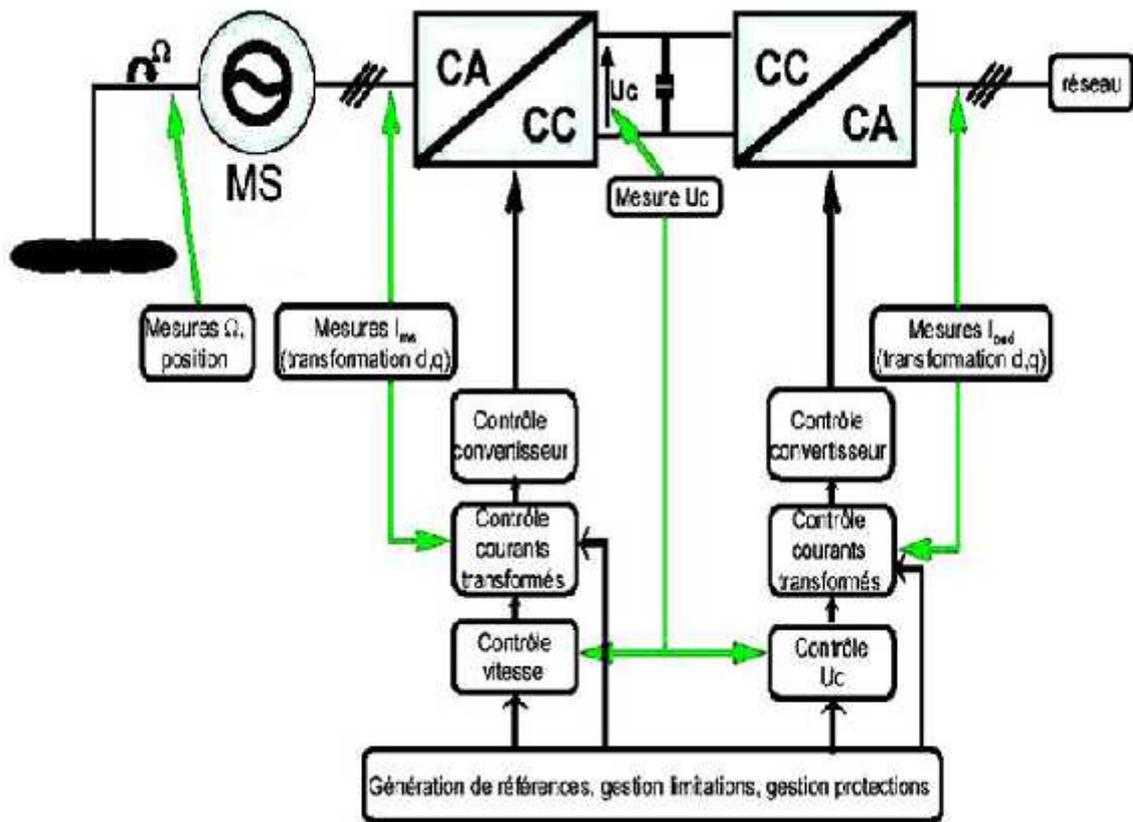


Figure I.18 Schéma électrique des convertisseurs et de la commande.

I.16 Stratégie commande

En ce qui concerne la stratégie de commande, les tâches de l'onduleur côté machine sont: atteindre le MPPT (Maximum Power Point Tracking – maximisation de la puissance extraite de l'eau), solliciter la machine vers son facteur de puissance unitaire, réduire au minimum les taux de distorsion harmoniques.

En mode opératoire, l'onduleur côté machine doit assurer le réglage du couple, ainsi de la vitesse pour d'une part fixer le point de fonctionnement, régler les déphasages courant/tension et enfin poursuivre une trajectoire sinusoïdale des courants extraits de la génératrice. Pour le réglage de la vitesse un correcteur PI a été choisi et pour le réglage des courants un correcteur PI tournant [15].

L'onduleur côté réseau doit, quant à lui, assurer le réglage de la tension du bus continu. Il gère aussi le transfert de puissance, tel que la puissance active moyenne entrante soit égale à la puissance active sortante (aux pertes près). Par ailleurs, la qualité des courants injectés se doit d'être la meilleure possible. Le réglage de la tension du bus continu est réalisé avec un correcteur PI et le contrôle des courants avec un correcteur PI résonant [16].

I.17 Différents générateurs d'électricité d'une hydrolienne utilisées

I.17.1 Machine synchrone

Ou alternateur : elle produit de l'électricité à courant alternatif, et fonctionne sur le même principe que la machine asynchrone. Son rotor tourne par contre à la même vitesse que le flux magnétique du stator, d'où son appellation. En effet, la composition du rotor en tôles feuilletées permet cette différence, mais son prix est plus élevé. Les hydroliennes, qui doivent être constituées d'un générateur suffisamment puissant, possèdent des alternateurs dits triphasés (voir figure I.19). Ce système permet un meilleur rendement et moins de pertes lors du transport de l'électricité.

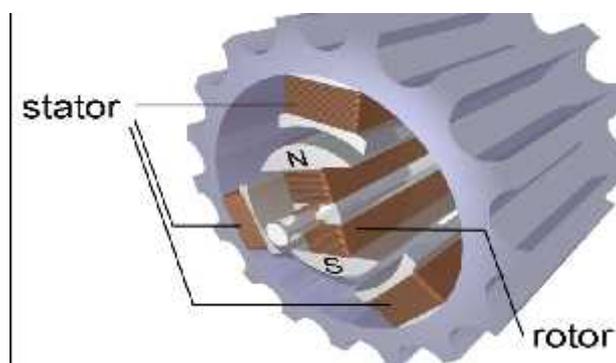


Figure I.19 Machine synchrone.

I.17.2 Dynamo ou génératrice de courant continu

Constituée du stator et du rotor. Le stator est soit un bobinage de cuivre, soit constitué d'aimants permanents, qui créent un flux magnétique. Le rotor est une bobine magnétisante qui tourne sur lui-même à l'intérieur du stator. L'inconvénient de la dynamo se situe au niveau des balais. Ceux-ci doivent rester en contact avec le collecteur (qui tourne en même temps que le rotor) lorsque la dynamo tourne. Ainsi, lorsque le collecteur tourne à vitesse élevée, les balais doivent augmenter leur pression sur celui-ci pour rester en contact, ce qui entraîne une usure rapide de ces balais à cause des frottements. De plus, une génératrice de courant continu coûte cher pour être utilisée à grande échelle, et elle est plus lourde qu'une machine (a)synchrone.

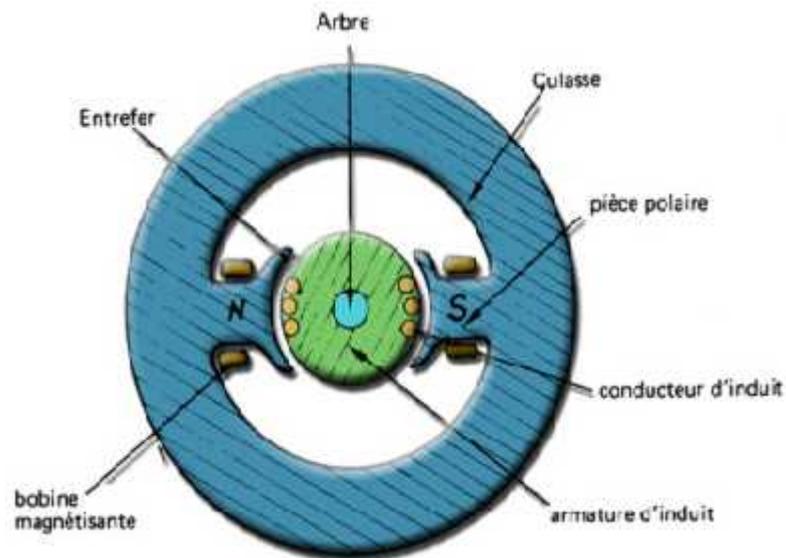


Figure I.20 Coupe d'une génératrice continu-dynamo.

I.17.3 Machine asynchrone

La machine asynchrone ou machine à induction dont le nom signifie que le rotor ne tourne pas à la même vitesse que le flux magnétique du stator. Souvent utilisée comme moteur (80% des applications), c'est un système peu cher et robuste qui crée un courant électrique alternatif. En fonctionnement moteur, son stator est traversé d'un courant continu, ce qui fait "tourner" le flux magnétique dans un sens donné. Ainsi, celui-ci fait tourner le rotor, qui est un aimant. Elle est de plus en plus présente sous forme de génératrice et l'avantage de ce système reste son prix raisonnable.

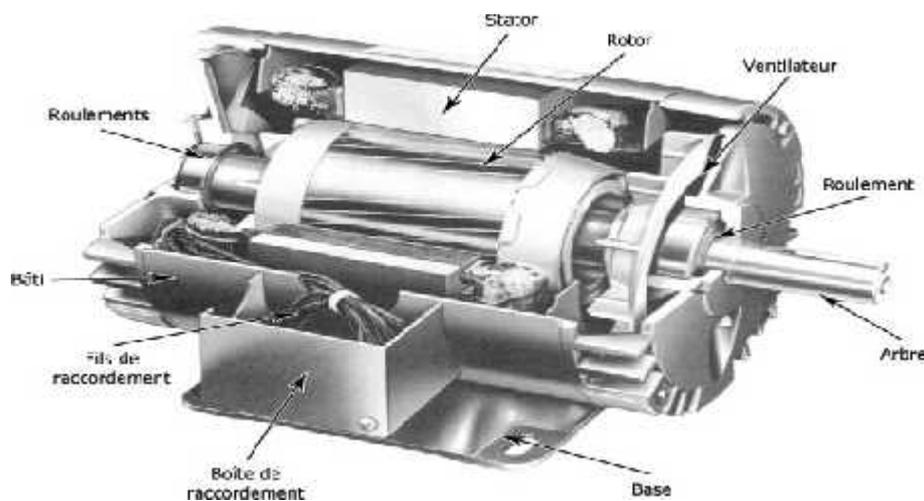


Figure I.21 Composants d'une machine asynchrone.

Tous ces générateurs d'électricité sont équipés de multiplicateurs qui permettent d'augmenter la vitesse de rotation de ces générateurs avec une faible vitesse de rotation des pales. Sans lui, la vitesse de rotation du rotor serait beaucoup trop faible pour espérer produire une quantité significative d'électricité.

Dans notre cas on va étudier une hydrolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentations.

I.18 Description du Fonctionnement de la MADA

I.18.1 Structure de la Machine

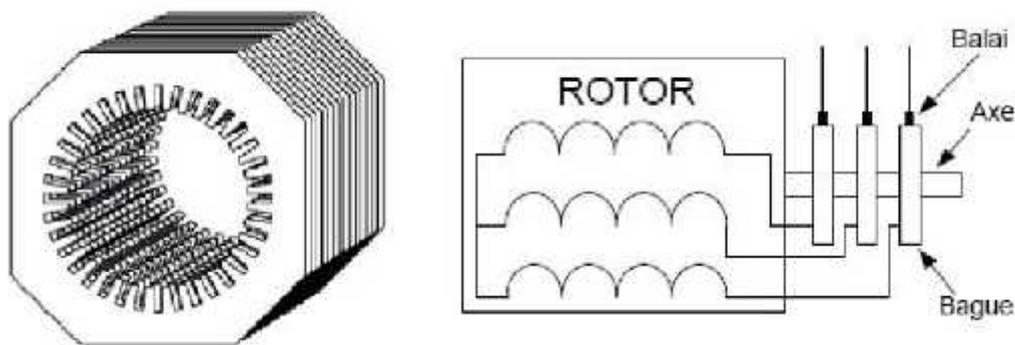


Figure I.22 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

Connue depuis 1899, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures; la machine asynchrone à double alimentation, MADA, présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure I.22).

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

➤ Différents modes de fonctionnement de la MADA

Les modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés en fonction de glissement g comme suit :

- **Stationnaire** ($g=1$) le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s . Le circuit rotorique est le siège d'une force électromotrice induite de fréquence f_r égale à celle du stator. Dans ce cas là la MADA se comporte comme un transformateur.
- **Hyposynchrone** ($0 < g < 1$) on fait tourner le rotor dans la même direction du flux statorique, la fréquence du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor croît, plus la fréquence f_r décroît, par conséquent la tension induite diminue linéairement et la valeur minimale à la vitesse du synchronisme.
- **Synchrone** ($g=0$) dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence f_r du rotor est nulle, et il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- **Hypersynchrone** ($g < 0$) par davantage d'accélération, la vitesse du rotor s'élève par rapport à celle du champ tournant, par conséquent la fréquence f_r devient négative, ce qui signifie que l'ordre de phase du rotor (a_r, b_r, c_r) s'inverse, ce qui engendre l'augmentation de la tension induite du rotor.

I.18.2 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

La MADA peut fonctionner en moteur comme générateur, en mode hyposynchrone et hypersynchrone. Ces modes de fonctionnement sont illustrés sur (figure I.23) ; avec P_r , P_m et P_s désignent les puissances du rotor, mécanique et du stator^[17].

a- fonctionnement moteur

- Mode hyposynchrone : dans ce mode la puissance P_r est fournie par le rotor
- Mode hypersynchrone : dans ce cas la puissance P_r est absorbée par le rotor.

b- fonctionnement générateur

- Mode hyposynchrone : dans ce mode la puissance P_r est absorbée par le rotor.
- Mode hypersynchrone : dans ce mode la puissance P_r est fournie par le rotor.

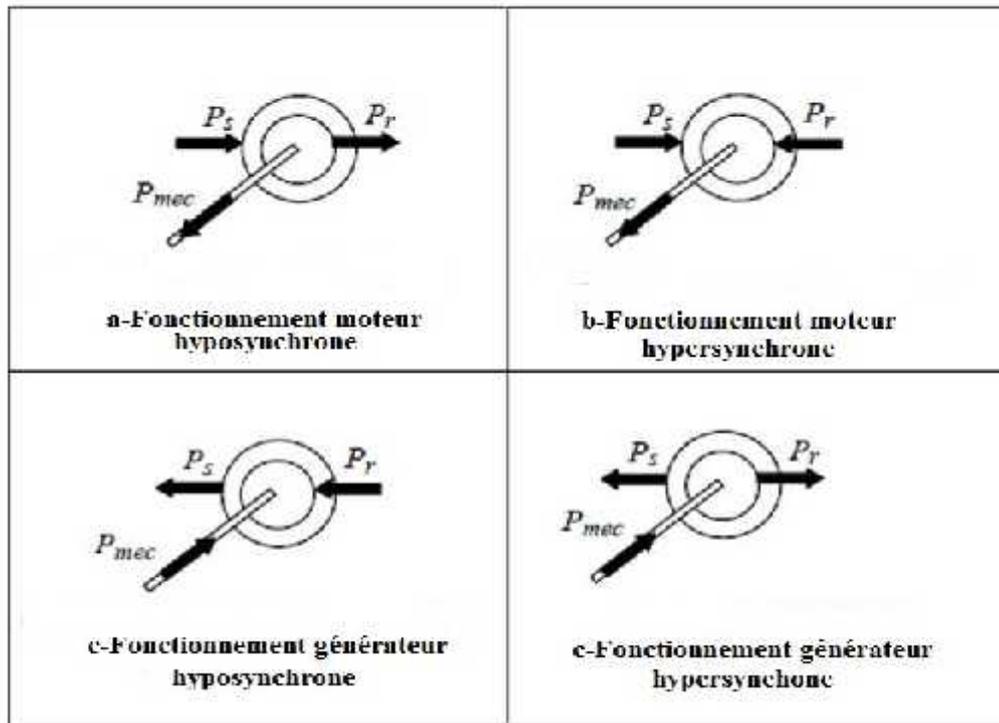


Figure 1.23 Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.

I.19 L'intérêt de la MADA

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles. Nous concluons que les intérêts majeurs de l'utilisation de cette machine sont :

- Le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine.
- Possibilité de fonctionner sur une grande plage de vitesse en hypo et hypersynchronisme.
- Possibilité de contrôler à la fois le couple et le facteur de puissance.
- Rendement élevé.

Le principal inconvénient de cette machine reste celui de la présence de balais-collecteurs qui la rend moins robuste et qui nécessite un entretien régulier.

I.20 Avantages et inconvénients de la MADA

I.20.1 Avantages de la MADA

Parmi ses nombreux avantages, nous citons:

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).

I.20.2 Inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA.

I.21 Accouplement mécanique

I.21.1 Attaque directe

La génératrice est connecté directement à l'axe de la turbine, cette dernière fonctionne à la vitesse basse de rotor ce que permet de supprimer le multiplicateur qui est le siège de perte de puissance. Le système hydrolien à attaque direct utilise la génératrice synchrone multipolaire à aimant permanent, la conception de cette machine est différente de celle fonctionnant à plus grande vitesse, en effet afin de produire de l'électricité avec une faible vitesse de rotation la génératrice doit posséder un grand diamètre pour obtenir une vitesse

de déplacement relative importante entre le rotor et le stator et permettre de loger un grand nombre de pôles^[18].

I.21.2 Attaque indirect

La vitesse de la turbine est très inférieure à la vitesse de la génératrice par conséquent la transmission mécanique entre le rotor de la turbine et celui de la génératrice se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. Des problèmes de vibrations, de bruits et de coût de maintenance sont liés à la présence de ce multiplicateur^[19].

I.22 Mode de fonctionnement

Il existe essentiellement deux modes de fonctionnements des hydroliennes suivant la source d'énergie, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable.

I.22.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Le système hydrolien se caractérise par une vitesse de rotation pratiquement il emploie des génératrices à induction connectées directement au réseau. La vitesse est réglée par le rapport du multiplicateur de vitesse et par le nombre de paires de pôles de la génératrice^[1]. Ce système présente des avantages et des inconvénients.

I.22.1.1 Avantages

- Pas besoin d'intégration de convertisseurs statiques dans le système.
- Ce système utilise des machines standards.
- Faible coût de revient du système.

I.22.1.2 Inconvénients

- Puissance extraite non optimisée et le maximum théorique de puissance atteint se que réduit nettement le rendement du système.

I.22.2 Fonctionnement à vitesse variable

Dans ce mode de fonctionnement l'hydrolienne tourne à vitesse variable. Indispensable d'optimiser et de réguler la puissance captée en fonction de courant marin, ceci par la régulation de la vitesse de rotation de l'hydrolienne nécessite d'utiliser des génératrices à fréquence fixe et vitesse variable fonctionner sur une large gamme de vitesse marin pour récupérer la puissance^[20].

I.22.2.1 Avantages

- Meilleur rendement énergétique.
- Meilleure qualité d'énergie électrique.
- Moins d'effets mécaniques subis par le train de puissance.

I.22.2.2 Inconvénient

- Complexité de la commande et de la construction du system.
- Elles sont plus chères que celles à vitesse fixe

Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous a permis dans un premier temps de faire connaissance d'une hydrolienne, sont histoire et sont fonctionnement. Puis on a fait une petite recherche sur les différents travaux réalisés sur l'hydrolienne, d'une manière générale, a savoir les composantes d'une hydrolienne, ces avantages et inconvénients et les différents types d'une hydrolienne. Et sur les applications dans le domaine électrique d'une façon particulier, nous avons vu les différentes génératrices utilisées dans la chaine de conversion d'énergie hydrolienne, en a établi une étude sur la machine asynchrone double alimentation (MADA), les avantages et les inconvénients de la MADA. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et à la commande du système de conversion hydrolienne basé sur une MADA.

Chapitre 2
Modélisation et
commande d'un
système hydrolienne

II.1 Introduction

Une hydrolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. La modélisation de la chaîne de conversion hydrolienne consiste à trouver une représentation de l'ensemble de ses éléments. Pour l'observation et l'analyse de l'évolution des grandeurs électrique de la machine.

La modélisation de chaîne de conversion d'énergie hydrolienne sera l'objet de ce chapitre.

II.2 Présentation de système à étudié

Le schéma global de la modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie hydrolienne connecté au réseau électrique, est constitué d'une turbine de rayon R raccordée à un arbre de transmission tournant à une vitesse Ω_t . Cet arbre entraîne une génératrice synchrone à double alimentation, à travers un multiplicateur de vitesse de gain G , trois commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'hydrolienne :

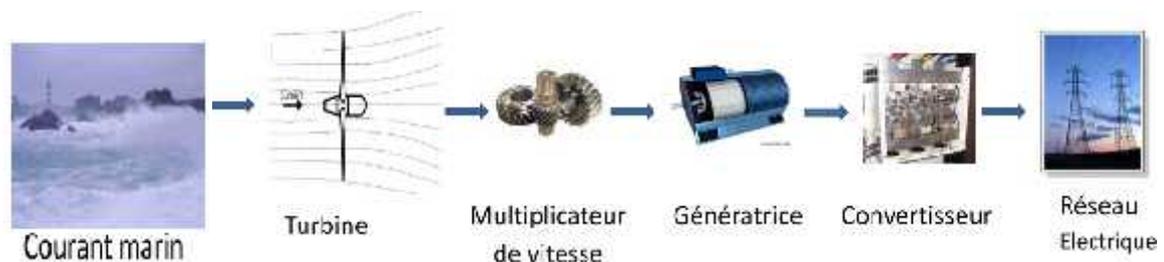


Figure II.1 schéma globale d'une chaîne de conversion hydrolienne.

II.3 Modélisation de la partie mécanique

II.3.1 Modélisation de la turbine

L'hydrolienne capte l'énergie cinétique de l'eau et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie de l'eau et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'eau, la surface balayée par le rotor et la vitesse des marées. La masse volumique de l'eau et sa vitesse sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. La puissance extraite par la turbine hydrolienne P_T est calculée par (II.1), où C_p est le coefficient de puissance dont la limite

Chapitre II Modélisation Et Commande D'un Système Hydrolienne

théorique est de 0.59 ; ρ est la vitesse spécifique, ρ est la masse volumique de l'eau, S_T est la surface balayée par les pales, V est la vitesse des marées.

$$P_T = 0.5 \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot S_T \cdot V^3$$

Avec P_T : puissance de la turbine hydrolienne, elle est donnée par la relation suivant

$$P_T = T_t \cdot \omega_t$$

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque hydrolienne. L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation (II.2) suivante [11] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,35 - 0,00167 \cdot \lambda^2 - 2 \cdot \sin(\lambda - 0,00184 \cdot \lambda^3 - 2) \quad (II.2)$$

Avec

$$\alpha = \frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{14,34 - 0,3 \cdot (\lambda - 2)}$$

La vitesse spécifique λ est donnée par la relation (II.3)

$$\lambda = (\omega_t \cdot R) / V \quad (II.3)$$

Le couple aérodynamique de l'hydrolienne est déterminé par la relation (II.4) :

$$C_{aer} = \frac{P_T}{\omega_t} = \frac{1}{2} \cdot \omega_t \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S_T \cdot V^3 \quad (II.4)$$

ω_t : Vitesse de la turbine

R : Rayon de la turbine hydrolienne

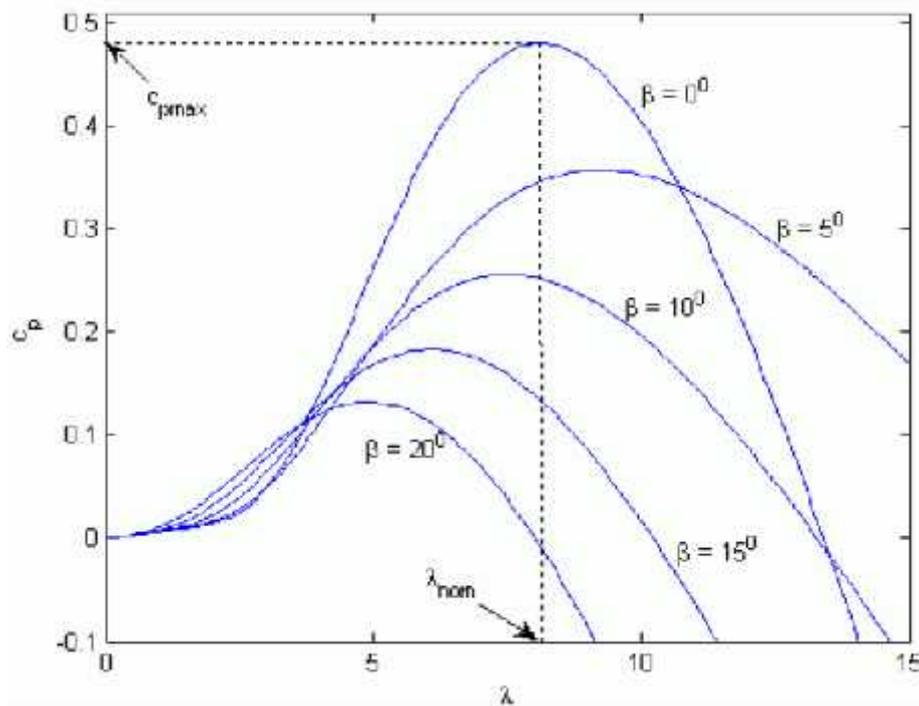


Figure II.2 Caractéristique $C_p(\lambda)$ pour divers valeur de β .

II.3.2 Modélisation de la transmission

La puissance captée par la turbine est transmise à la génératrice. Dans le cas où cette génératrice est une machine asynchrone (structures MAS, MASDA), un multiplicateur de vitesse est inséré dans la transmission afin d'effectuer l'adaptation de vitesse.

Le multiplicateur de vitesse permet, outre l'adaptation de vitesse, d'avoir une certaine élasticité entre ce qui se passe côté entrée (source primaire fluctuante) et, côté sortie (Générateur et réseau) et des oscillations mécaniques peuvent en résulter comme nous le verrons plus loin.

Le système mécanique complet comprend donc les éléments suivants:

- Un moyeu sur lequel sont reliées les pales.
- L'axe lent.
- L'axe rapide (rotor de la génératrice).
- Le multiplicateur de vitesse (sauf pour les systèmes à attaque directe).

Le modèle sera donc différent si la structure possède un multiplicateur de vitesse (structures MAS et MASDA) ou non (structure MS).

II.3.3 Modélisation de l'arbre de transmission

Un arbre est un organe mécanique transmettant une puissance sous forme d'un couple et d'un mouvement de rotation. La forme cylindrique de cet organe est à l'origine de son nom.

La transmission mécanique est représentée par l'équation (II.5) fondamentale de la dynamique pour un arbre rigide est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \Gamma_g - \Gamma_t - \Gamma_{visq} \quad (II.5)$$

$$\Gamma_{mec} = \Gamma_g - \Gamma_t - \Gamma_{visq}$$

Avec Γ_{mec} : Couple mécanique

Γ_{visq} : Couple visqueux est donnée par $\Gamma_{visq} = f\Omega_{mec}$

J : Inertie total de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine

f : Coefficient de frottement

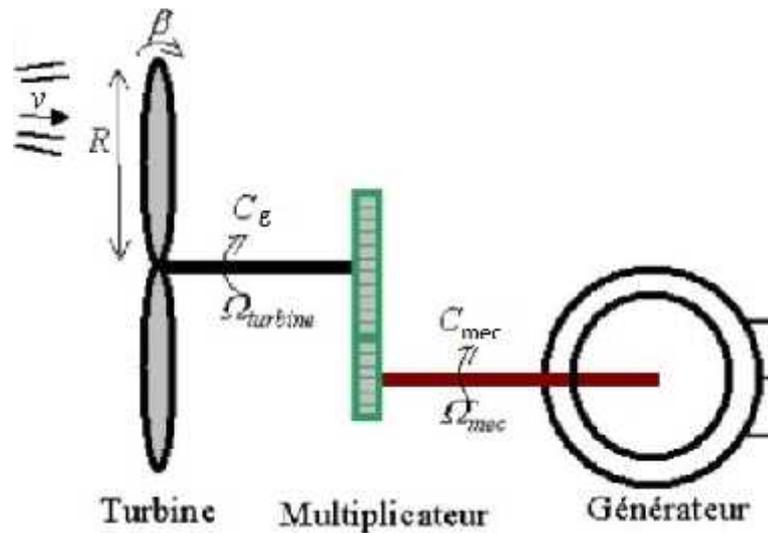


Figure II.3 Schéma de la turbine hydrolienne.

A partir de ce que précède, on aboutit le schéma bloc de notre aérogénérateur :

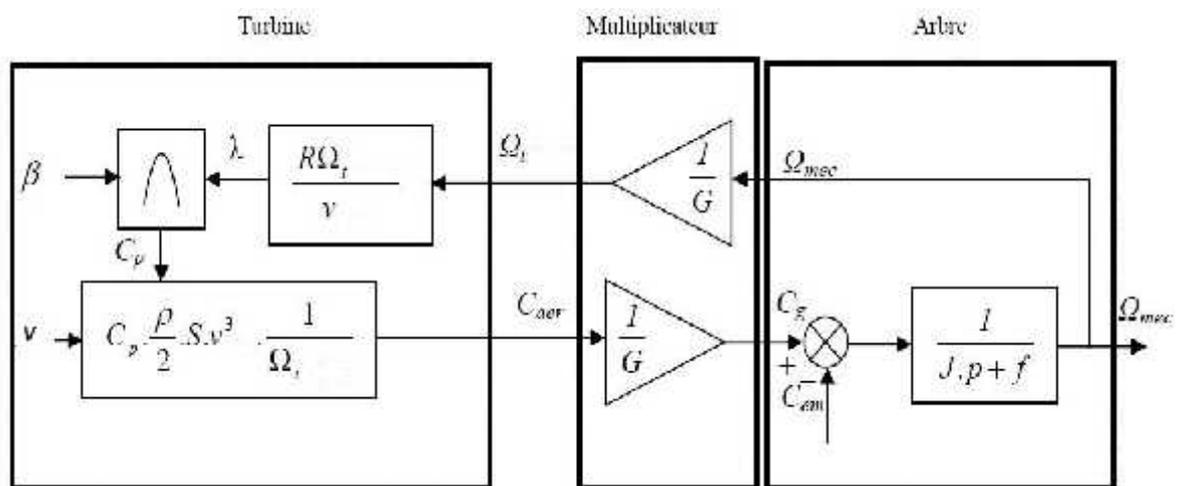


Figure II.4 Modèle de l'aérogénérateur.

Le schéma bloc, nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée, par action sur l'angle de calage des pales et sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse des marées est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

II.4 Stratégies de commande de la turbine hydrolienne

La vitesse des marées est constante dans le temps, et pour garantir un captage maximal de l'énergie hydrolienne incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle de l'eau et l'angle d'incidence des pales.

II.5 Point de fonctionnement à puissance maximum MPPT

Les hydroliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le l'eau. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'hydrolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie.

On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum MPPT (Maximum Power Point Tracking) Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice. On distingue deux structures de commande :

- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique
- Le contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique

II.5.1 Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique

Pour cette structure de commande on pose l'hypothèse que la vitesse de l'eau varie très peu en régime permanent, alors on obtient la relation (II. 6)

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \Gamma_{mec} = 0 \quad (II. 6)$$

On néglige le couple des frottements visqueux $\Gamma_{visq} = 0$ on obtient donc la relation (II.7)

$$\Gamma_{mec} = \Gamma_g \quad II. 7$$

On estime le couple hydrodynamique à partir d'une estimation de la vitesse de courant marin et de la mesure de la vitesse mécanique

$$C_{aer} = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} \cdot C_{p-max} \cdot \rho \cdot S_T \cdot V_{est}^3 \quad II. 8$$

Avec le couple hydrodynamique estimé on détermine le réglage du couple électromagnétique

$$\Gamma_{mec-rég} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.9)$$

Chapitre II Modélisation Et Commande D'un Système Hydrolienne

Une estimation de la vitesse de la turbine Ω_t est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique

$$\Omega_{t-est} = \Omega_{mec}/G \quad (II.10)$$

A partir de l'équation (II.11) on peut estimer la vitesse de courant d'eau

$$V_{est} = \frac{R \cdot \Omega_{t-est}}{\lambda_{opt}} \quad II.11$$

Et $S_T = \pi \cdot R^2$

Ou C_{P-max} correspond à la valeur maximum de coefficient de puissance pour un angle de calage $\beta = 0$, voir Figure II.5

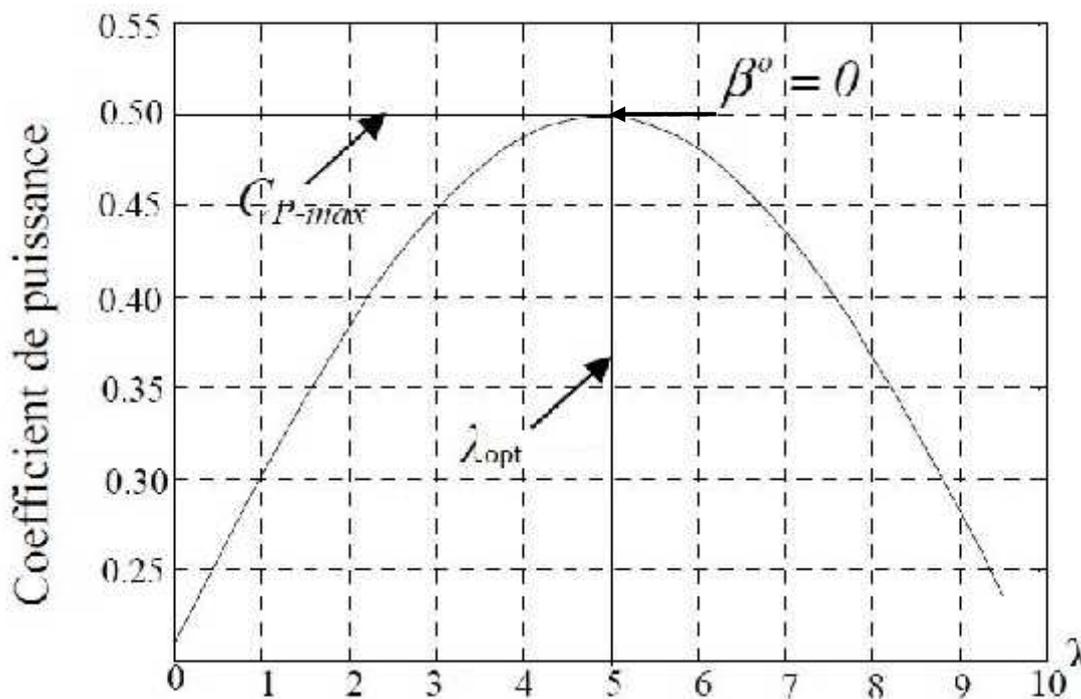


Figure II.5 Coefficient de puissance C_p en fonction de rapport de vitesse .

En regroupant les équations II.7 , (II.8), (II.9), et (II.11) on obtient une relation globale L'algorithme de MPPT est donné pas la relation (II.12)

$$\Gamma_{mec} = \frac{C_{Pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot \frac{R^5}{G^3} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II.12)$$

L'ensemble de bloc est représenté par la Figure (II.6)

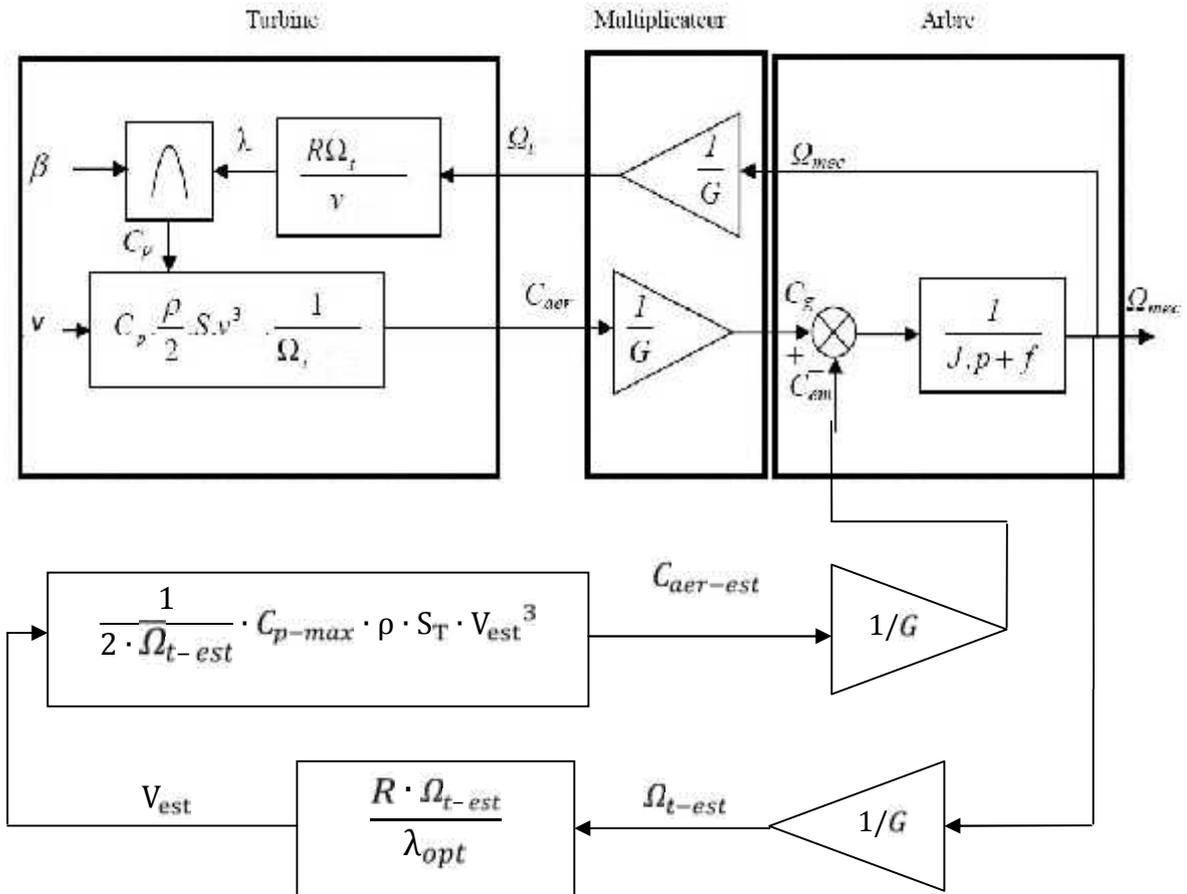


Figure II.6 schéma du modèle de la MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

II.5.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique

A partir de la vitesse d'eau mesurée, on détermine la vitesse mécanique optimale de la turbine (correspondant à λ_{opt} , et $\beta = 0^\circ$, voir figure (II.6)), en multipliant cette dernière par la valeur du gain on obtient la vitesse mécanique du rotor de la MADA, qui est utilisée comme grandeur de référence pour un régulateur ; ce dernier élabore une consigne de commande, convenant au couple électromagnétique que devrait développer la machine pour passer à la vitesse optimale.

Le couple issue de l'asservissement de vitesse, sera utiliser comme grandeur de référence du couple dans la structure fonctionnelle du modèle de la turbine figure II.3.L'ensemble est représenté par la figure II.7.

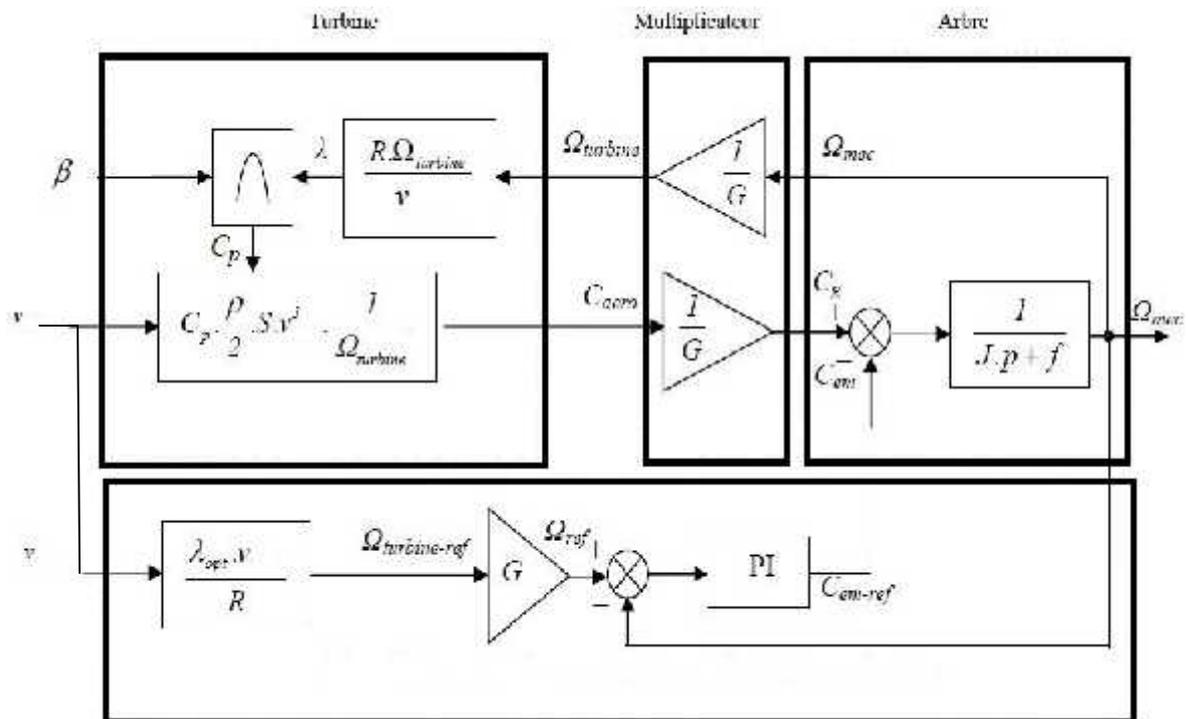


Figure II.7 schéma du modèle de la MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

II.6 Modélisation de la partie électrique

II.6.1 Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais ^[18] (Figure II.8).

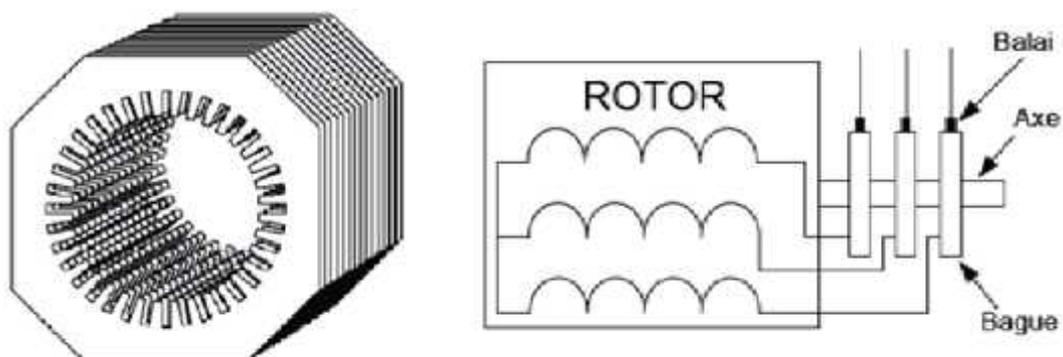


Figure II.8 Structure de stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone.

II.7 Modélisation de la MADA

Dans le cas de la production d'énergie par les hydroliennes, la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) permet d'optimiser la puissance produite. En effet, compte tenu du comportement de la vitesse des courants des marées, la MADA permet de compenser ces variations dans des proportions acceptables, tout en garantissant une bonne qualité de l'énergie produite. Nous allons maintenant décrire la modalisation dans un repère tournant diphasé (d, q) lié au champ tournant en utilisant les transformations de Park permettant la conservation des puissances. Soit θ l'angle électrique entre l'axe d'un repère diphasé et le repère fixe lié à la phase du stator.

II.7.1 Hypothèses simplificatrices

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.
- Circuit magnétique non saturé.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- les coefficients d'inductance propre sont constants

II.7.2 Modèle de la MADA dans le repère naturel abc

On a trois bobines statorique (S_A, S_B, S_C) décalées entre elles par un angle de (120°). alimentée par des tension sinusoïdale équilibrés (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) et de pulsation $\omega_s = 2\pi f_s$, et trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, (R_a, R_b, R_c). alimentée par des tension (V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}) et de pulsation $\omega_r = 2\pi f_r$ [21].

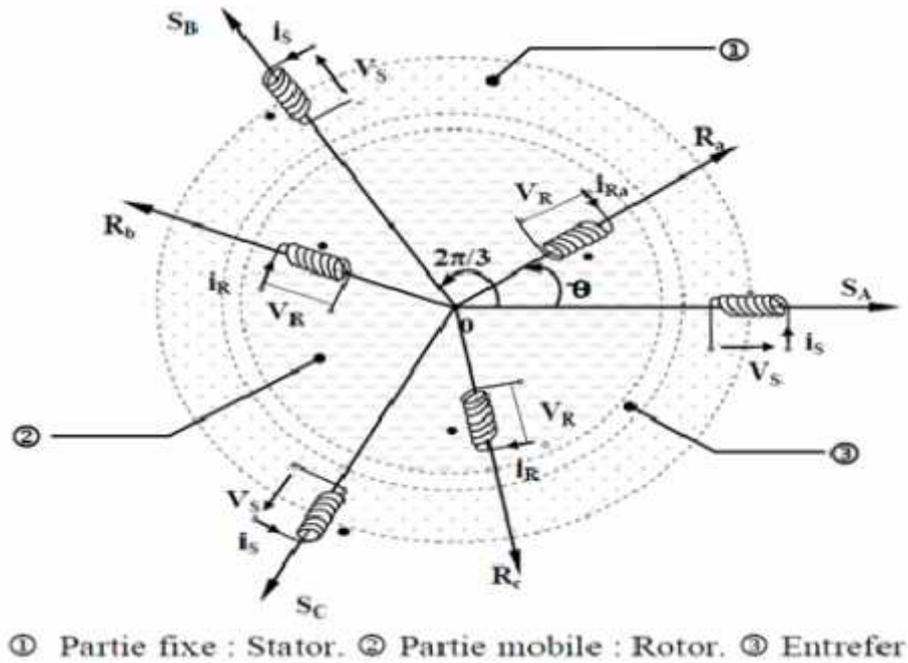


Figure II.9 Représentation de la MADA.

II.7.2.1 Equation électriques

Pour les phases statoriques on a :

$$\begin{aligned}
 V_{sa} &= R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\
 V_{sb} &= R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\
 V_{sc} &= R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{II.15}$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}
 \tag{II.16}$$

L'équation générale du stator est :

$$V_{sabc} = R_s I_{sabc} + \frac{d}{dt} \varphi_{sabc}
 \tag{II.17}$$

Avec

V_{sabc} : Vecteur des tensions statorique

I_{sabc} : Vecteur des courants statorique

R_s : Vecteur des résistances statorique

φ_{sabc} : Vecteur des flux d'enroulement statorique

Pour les phases rotoriques on a :

$$\begin{aligned}
 V_{ra} &= R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\
 V_{rb} &= R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\
 V_{rc} &= R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt}
 \end{aligned} \tag{II.18}$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{matrix} &= \frac{d}{dt} \begin{matrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{matrix} + \begin{matrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{matrix} \begin{matrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{matrix}
 \end{aligned} \tag{II.19}$$

L'équation générale du rotor est :

$$V_{rabc} = R_r I_{rabc} + \frac{d}{dt} \varphi_{rabc} \tag{II.20}$$

Avec

V_{rabc} : Vecteur des tensions rotorique

I_{rabc} : Vecteur des courants rotorique

R_r : Vecteur des résistances rotorique

φ_{rabc} : Vecteur des flux d'enroulement rotorique

II.7.2.2 Équations des flux

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{matrix} &= \begin{matrix} L_{ss} & & \\ & L_{ss} & \\ & & L_{ss} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{matrix} + \begin{matrix} M_{sr} & & \\ & M_{sr} & \\ & & M_{sr} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{matrix}
 \end{aligned} \tag{II.21}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{matrix} &= \begin{matrix} L_{rr} & & \\ & L_{rr} & \\ & & L_{rr} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{matrix} + \begin{matrix} M_{rs} & & \\ & M_{rs} & \\ & & M_{rs} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{matrix}
 \end{aligned} \tag{II.22}$$

Donc les équations magnétiques de la MADA sont donnée par :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{sabc} &= L_{ss} I_{sabc} + M_{sr} I_{rabc} \\
 \varphi_{rabc} &= L_{rr} I_{rabc} + M_{rs} I_{sabc}
 \end{aligned} \tag{II.23}$$

Avec

$$L_S = \begin{matrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{matrix} \qquad L_r = \begin{matrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{matrix}$$

$$M_{sr}^t = M_{rs} = M_{max} \cdot \begin{matrix} \cos & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \end{matrix} \quad (II.24)$$

L_{ss} , L_{rr} : Matrice d'induction statorique et rotorique

M_{rs} : Matrice d'induction mutuelle

l_s , l_r : Inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

L_s , L_r : inductances propres statoriques et rotoriques de la machine.

M_s , M_r : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la machine.

M_{sr} : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

On combine (II.17), (II.20), et (II.23) on trouve finalement :

$$\begin{aligned} V_{sabc} &= R_s I_{sabc} + \frac{d}{dt} L_{ss} I_{sabc} + M_{sr} I_{rabc} \\ V_{rabc} &= R_r I_{rabc} + \frac{d}{dt} L_{rr} I_{rabc} + M_{rs} I_{sabc} \end{aligned} \quad (II.25)$$

II.7.3 Modèle de la MADA dans le repère de Park

II.7.3.1 Transformation de Park

On applique la transformation de Park sur les équations de tensions et flux il nous permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants. La relation entre les grandeurs triphasées et les grandeurs biphasées s'écrivent sous la forme :

$$\begin{matrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{matrix} = P(\theta) \begin{matrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{matrix} \longleftrightarrow \begin{matrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{matrix} = P(\theta)^{-1} \begin{matrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{matrix}$$

Ou

$$P(\theta) = (2/3) \cdot \begin{matrix} \cos & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{matrix} \quad (II.26)$$

$P(\theta)$: La matrice de la transformation de Park

$$P(\theta)^{-1} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$P(\theta)^{-1}$: La matrice de la transformation inverse de Park

θ : L'angle de rotation électrique entre l'axe d de repère diphasée et le repère fixe lié à la phase de stator comme le montre la figure II .13

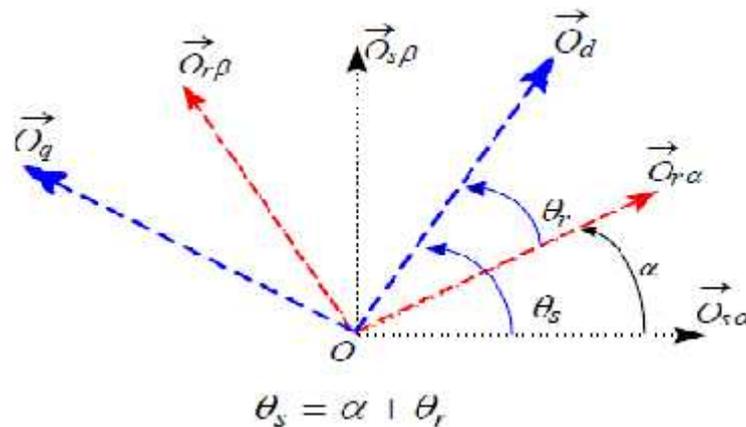


Figure II.10 Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

Pour les grandeurs statoriques: $\theta = \theta_s$

Et pour les grandeurs rotorique: $\theta_r = \theta_s - \theta_m$

Après l'application de la transformation de Park on trouve Le système d'équation de tension (II.28), et le système d'équation magnétiques (II.29). Qui représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (d, q) lié au champ tournant [22].

II.7.3.1.1 Equation électriques

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} - \frac{d}{dt} \psi_{sq} \\
 V_{sq} &= R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} \\
 V_{s0} &= R_s I_{s0} + \frac{d}{dt} \psi_0 \\
 V_{rd} &= R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} - \frac{d}{dt} \psi_{rq} \\
 V_{rq} &= R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} \\
 V_{r0} &= R_r I_{r0} + \frac{d}{dt} \psi_0
 \end{aligned} \tag{II.28}$$

On un système triphasées sinusoïdale équilibrés donc

$$V_{s0} = R_s \cdot I_{s0} + \frac{d}{dt} \psi_0 = 0$$

Notons que

$$\frac{d}{dt} \psi_s = \omega_s : \text{Pulsation statorique (imposée par le réseau 50Hz)}$$

$$\frac{d}{dt} \psi_r = \omega_r : \text{Pulsation rotorique (influencée par le convertisseur MLI)}$$

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m$$

$$\omega_m = \omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega_{méc}$$

ω_m : Est la pulsation mécanique

Nous pouvons alors écrire:

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\
 V_{sq} &= R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \\
 V_{rd} &= R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} - \omega_r \psi_{rq} \\
 V_{rq} &= R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} + \omega_r \psi_{rd}
 \end{aligned} \tag{II.29}$$

II.7.3.1.2 Equation magnétiques

$$\begin{aligned}
 \psi_{sd} &= l_s I_{sd} + M I_{rd} \\
 \psi_{sq} &= l_s I_{sq} + M I_{rq} \\
 \psi_{rd} &= l_r I_{rd} + M I_{sd} \\
 \psi_{rq} &= l_r I_{rq} + M I_{sq}
 \end{aligned} \tag{II.30}$$

Telle que

$l_r = L_r - M_r$: Inductances propre cycliques rotoriques.

$l_s = L_s - M_s$: Inductances propre cycliques statorique.

$M = (3/2)M_{\max}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Avec respectivement

V_{sd}, V_{sq}, V_{rd} et V_{rq} tensions statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé.

I_{sd}, I_{sq}, I_{rd} , et I_{rq} courants statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé.

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système dq

II.7.3.1.3 Équation de puissance et de couple

Après avoir exprimé les équations de la machine, on va présenter celle du couple électromagnétique. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes (d, q) est donnée comme suit

$$\bar{S} = \bar{V}_s I_s + \bar{V}_r I_r \quad (II.31)$$

$$\bar{S} = V_{sd} + jV_{sq} I_{sd} - jI_{sq} + V_{rd} + jV_{rq} I_{rd} - jI_{rq} \quad (II.32)$$

$$\bar{S} = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} + j V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} + V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} + j V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \quad (II.33)$$

$$\bar{S} = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} + V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} + j V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} + V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \quad (II.34)$$

$$P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \quad (II.35)$$

$$P_s = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} I_{sd} + (R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd}) I_{sq} \quad (II.36)$$

$$P_s = R_s V_{sd}^2 + R_s V_{sq}^2 + I_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + I_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (II.37)$$

$$P_{em} = \omega_s \varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd} \quad (II.38)$$

Avec $\theta_{e=p\theta_m}$ et $\omega_s = P_s$

$$P_{em} = P_s \varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd} \quad (II.39)$$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{s} = P_s \varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd} \quad II.40$$

Donc Le couple électromécanique :

$$T_{em} = P(\varphi_{sd}I_{sq} - \varphi_{sq}I_{sd}) = \Gamma_r + f\Omega r + J \frac{d}{dt} \Omega r \quad (11.41)$$

Γ_r : Couple résistant

Ωr : Vitesse de rotation du rotor de la machine

f : Coefficient de frottement

J : Moment d'inertie de l'ensemble machine et turbine hydrolienne

P : Nombre de paire de pôle de la machine

En explicitant les flux statoriques et rotoriques en fonction des inductances :

$$\Gamma_{mec} = \frac{3}{2} PM_{sr} I_{sq}I_{rd} - I_{sd}I_{rq} = PM I_{sq}I_{rd} - I_{sd}I_{rq} \quad (11.42)$$

Cette relation très importante met en évidence le fait que le couple résulte de l'interaction de composantes des courants statoriques et rotoriques en quadrature ^[23].

II.8 Modèle de la MADA en vu de la commande

II.8.1 Commande vectorielle

La commande vectorielle fut une révolution historique pour la machine asynchrone. Cette technique consiste à ramener le comportement de la machine asynchrone, du point de vue variation de vitesse, à celui du moteur à courant continu, en effectuant un découplage entre le flux et le couple électromagnétique ^[24].

Il existe plusieurs types de contrôles vectoriels, nous n'aborderons dans ce chapitre que la commande vectorielle directe avec orientation du flux statorique. Nous avons vu que le couple s'exprime dans le repère dq comme un produit croisé de courant ou de flux. La relation du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et des courant rotoriques est donnée par :

$$\Gamma_{em} = P \frac{M}{L_s} \varphi_{sq}I_{rd} - \varphi_{sd}I_{rq} \quad (11.43)$$

On s'aperçoit que si l'on élimine le deuxième produit, alors le couple ressemblerait fort à celui d'une MCC. Il suffit, pour ce faire, d'orienter le repère dq de manière à annuler la composante de flux en quadrature. C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d) et donc d'avoir $\varphi_{sq} = 0$. Ainsi $\varphi_{sd} = \varphi_s$ uniquement

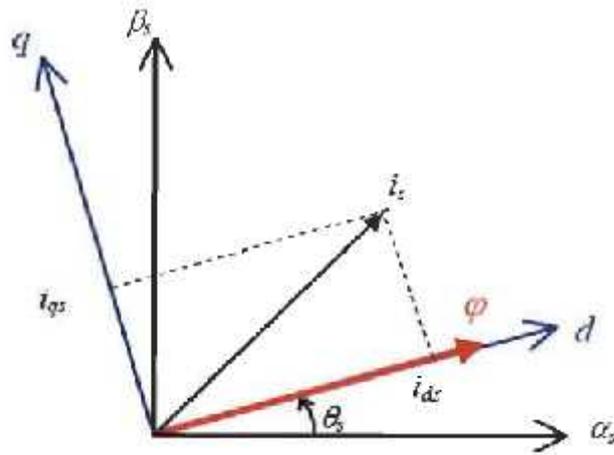


Figure II.11 Principe du contrôle vectoriel.

Donc on trouve :

$$\Gamma_{em} = P \frac{M}{L_s} \varphi_{sd} I_{rq} \quad (II.44)$$

Pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les hydroliennes, on peut négliger la résistance statorique tout en considérant le flux statorique constant ^[25].

Donc on a $\varphi_{sd} = \varphi_s$ et $R_s = 0$, l'équation (II.28) devient:

$$V_{sabc} = \frac{d}{dt} \varphi_{sabc} \quad II.45$$

Et on peut alors écrire que:

$$\begin{aligned} V_{sd} &= 0 \\ V_{sq} &= \omega_s \varphi_{sd} = V_s \end{aligned} \quad II.46$$

$$\begin{aligned} \varphi_s &= l_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 &= l_s I_{sq} + M I_{rq} \end{aligned} \quad II.47$$

ω_s : est la pulsation électrique des grandeurs statorique

A partir de l'équation (II.47), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{aligned} I_{sd} &= \frac{\varphi_s}{l_s} - \frac{M}{l_s} I_{rd} \\ I_{sq} &= - \frac{M}{l_s} I_{rq} \end{aligned} \quad II.48$$

II.8.2 Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{aligned} P_s &= V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s &= V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{aligned} \quad (II.49)$$

On a $V_{ds}=0$ donc on aura

$$\begin{aligned} P_s &= V_s I_{sq} \\ Q_s &= V_s I_{sd} \end{aligned} \quad (II.50)$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} dans l'équation (II.50), on obtient

$$\begin{aligned} P_s &= -V_s \frac{M}{l_s} I_{rq} \\ Q_s &= V_s \frac{\varphi_s}{l_s} - V_s \frac{M}{l_s} I_{rd} \end{aligned} \quad (II.51)$$

En tirant $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (II.46), l'expression (II.50) devient:

$$\begin{aligned} P_s &= -V_s \frac{M}{l_s} I_{rq} \\ Q_s &= \frac{V_s^2}{\omega_s l_s} - V_s \frac{M}{l_s} I_{rd} \end{aligned} \quad (II.52)$$

II.8.3 Relation entre les tensions rotoriques et courants rotoriques

Exprimons les flux rotoriques d'après les équations (II.30) en remplaçant les courants statoriques, on trouve :

$$\begin{aligned} \varphi_{rd} &= L_r - \frac{M^2}{l_s} I_{rd} + M \frac{V_s}{\omega_s l_s} \\ \varphi_{rq} &= L_r - \frac{M^2}{l_s} I_{rq} \end{aligned} \quad (II.53)$$

Ces expressions des flux rotoriques sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (II.29). Nous obtenons alors:

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r I_{rd} + l_r - \frac{M^2}{l_s} \frac{d}{dt} I_{rd} - g\omega_s l_r - \frac{M^2}{l_s} I_{rq} \\ V_{rq} &= R_r I_{rq} + l_r - \frac{M^2}{l_s} \frac{d}{dt} I_{rq} + g\omega_s l_r - \frac{M^2}{l_s} I_{rd} + g\omega_s \frac{M V_s}{\omega_s l_s} \end{aligned} \quad (II.54)$$

$g = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$: est le glissement de la MADA

Chapitre II Modélisation Et Commande D'un Système Hydrolienne

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. Ainsi les puissances actives et réactives désirées.

A partir des équations (II.52) et (II.54) on obtient le schéma bloc ci-dessous de la MADA à réguler. Voir Figure II.12.

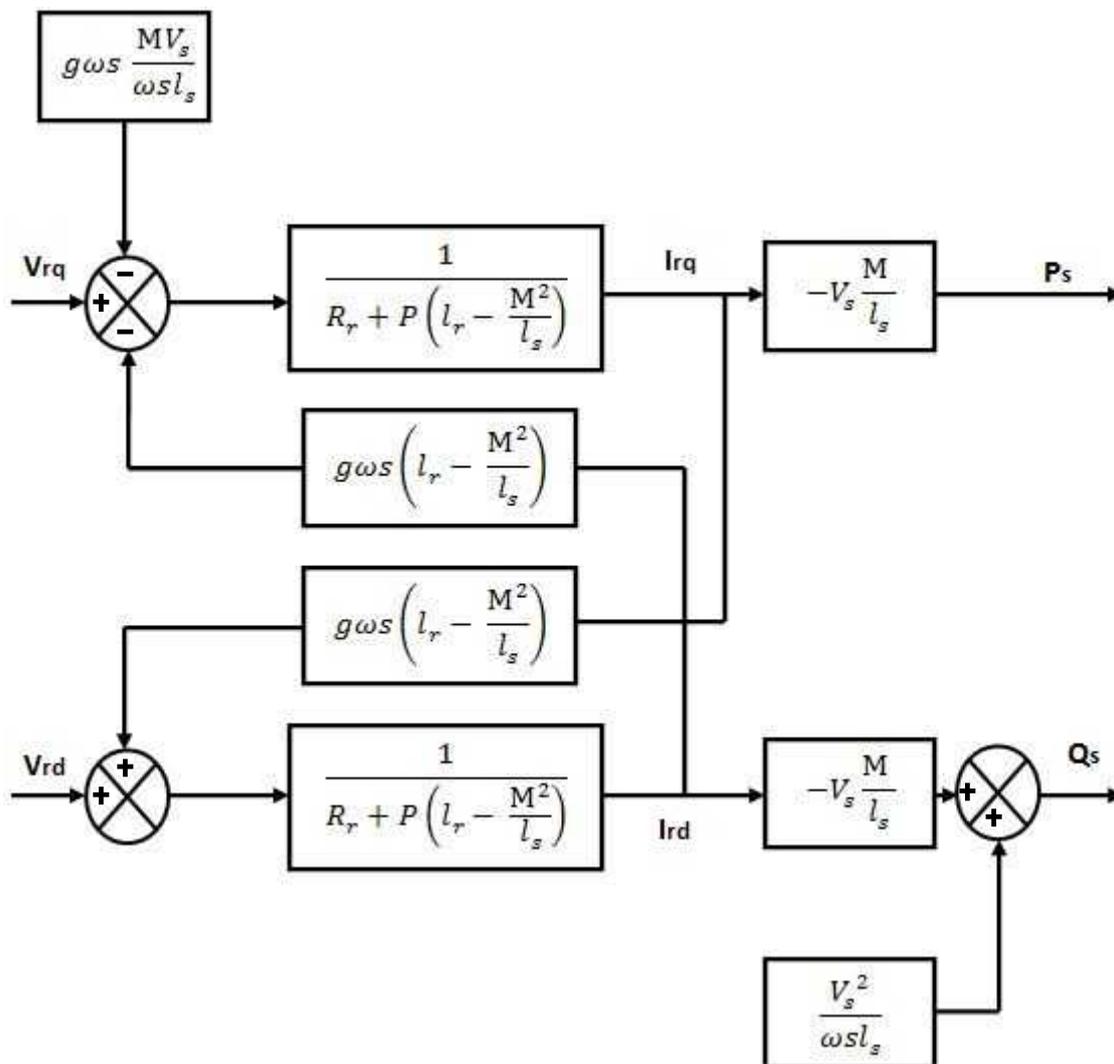


Figure II.12 Schéma bloc de la MADA.

L'expression $g_s L_r - \frac{M^2}{L_s}$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre.

Ainsi il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine, qui vont être étudiées et simulées dans le chapitre 3.

II.9 Modélisation des convertisseurs statiques

Dans notre application, l'interface d'électronique de puissance utilisée, est une cascade (Redresseur-filtre-onduleur), l'ensemble est représenté sur la Figure II.13

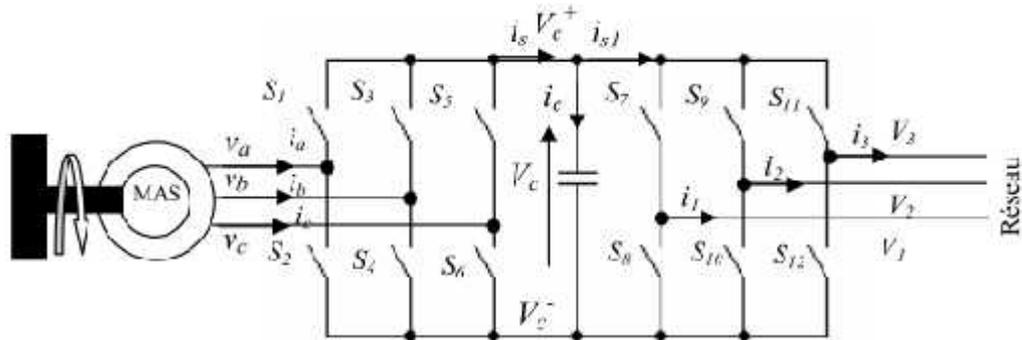


Figure II.13 Schéma du convertisseur liant la MAS au réseau.

II.9.1 Modélisation de redresseur MLI

La Figure II.14 représente le schéma d'un redresseur MLI

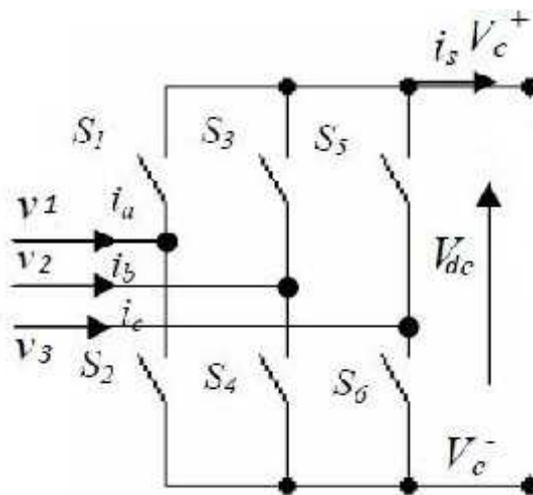


Figure II.14 schéma d'un redresseur MLI.

En utilisant les fonctions de connexion S_i , avec $i=1$ à 6 , pour chaque interrupteur on définit la matrice de transfert de redresseur comme suit :

$$\begin{matrix} V_c^+ \\ V_c^- \end{matrix} = \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ S_4 & S_5 & S_6 \end{matrix} \cdot \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{matrix} \quad (II.55)$$

Ou

$$V_{dc} = V_c^+ - V_c^-$$

De même on peut exprimer le courant continu i_s en fonction des courants d'entrée :

$$i_s = \begin{matrix} S_1 & S_3 & S_6 \end{matrix} \cdot \begin{matrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{matrix} \quad (II.56)$$

II.9.2 Modélisation du bus continu

On insère entre le redresseur et l'onduleur un filtre capacitif 'C', celle-ci absorbe la différence du courant unidirectionnel i_s , supprime les brusques variations de V_s lors des commutations et produit de l'énergie réactive.

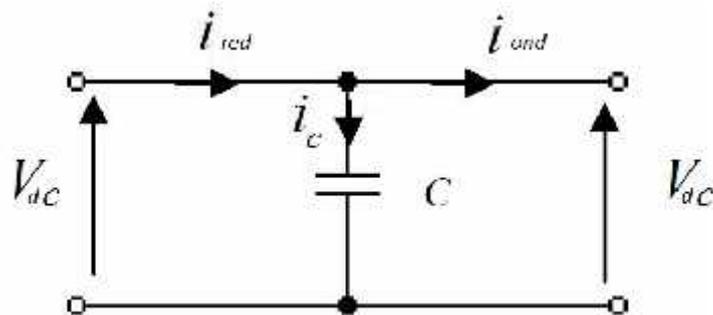


Figure II.15 Schéma électrique filtre passif.

L'évolution temporelle de la tension de bus continu est obtenue à partir de l'intégration de courant capacitif :

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C} i_c \quad (II.57)$$

La tension de bus continu est égale à l'intégration de courant capacitif et son expression s'écrit comme suit :

$$V_{dc} t = V_0 + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt \quad II.58$$

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad II.59$$

II.9.3 Modélisation du l'onduleur MLI

La Figure II.16 représente un onduleur de tension alimenté par la tension V_{dc} :

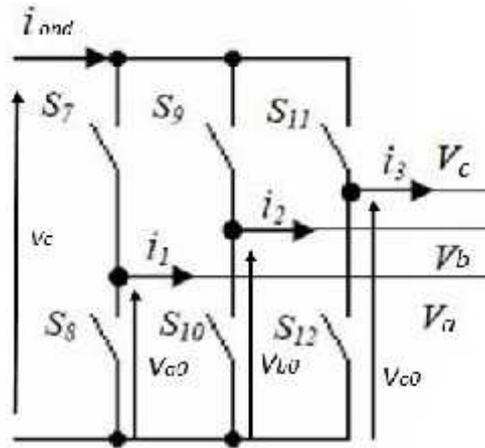


Figure II.16 Schéma d'un onduleur de tension.

L'onduleur MLI peut être modélisé par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= \frac{2}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0} \\
 V_{bn} &= \frac{1}{3} V_{a0} - \frac{2}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0} \\
 V_{cn} &= \frac{1}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} - \frac{2}{3} V_{c0}
 \end{aligned}
 \tag{II.60}$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}
 \tag{II.61}$$

S_a, S_b, S_c : Fonctions logique correspondant à l'état de l'interrupteur.

Le courant i_{ond} en fonction des courants alternatifs i_a, i_b, i_c est donnée par :

$$i_{ond} = \begin{bmatrix} S_7 & S_9 & S_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}
 \tag{II.62}$$

II.10 Commande par Modulation Sinus-Triangle

La MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{aligned}
 V_{ref a} &= V_m \sin(2\pi ft) \\
 V_{ref b} &= V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 V_{ref c} &= V_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{II.63}$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_t(t) = \begin{cases} V_{pm} \left(4\left(\frac{t}{T_p}\right) - 1\right) & \text{si } 0 \leq t < \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left(-4\left(\frac{t}{T_p}\right) + 3\right) & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t < T_p \end{cases}
 \tag{II.64}$$

Où : $T_p = \frac{1}{f_p}$

f : Fréquence de la tension de référence (en Hz),

T_p : Période de la porteuse (en seconde),

V_m : Amplitude de la tension de référence (en V),

V_{ref} : Tension de référence (en V),

V_{pm} : Valeur crête de l'onde de modulation (en V).

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

1. L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f), $m = \frac{f_p}{f}$
2. Le coefficient de réglage en tension r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_m) à la valeur crête de l'onde de modulation V_{pm} , $r = \frac{V_m}{V_{pm}}$

f_p : Fréquence de la porteuse (en Hz).

Il existe différents types de modulation de largeur d'impulsion :

- MLI naturelle, le calcul des instants de commutation se fait par l'intersection du signal de référence avec un signal triangulaire.
- MLI avec contrôle d'amplitude, l'amplitude crête est constante et pour la valeur efficace du fondamental, on agit sur la largeur des impulsions. Pour maintenir $U/f = \text{Cte}$, il faut modifier la valeur des angles d'amorçage de la MLI pour chaque valeur de vitesse. Ceux-ci sont donc pré calculés et stockés dans une mémoire.
- MLI vectorielle : les instants de commutation sont calculés en ligne.

En ce qui nous concerne pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs, on utilise la technique MLI naturelle consistant à comparer le signal de référence (onde modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence à un signal triangulaire (onde porteuse) de fréquence élevée. Le signal

Chapitre II Modélisation Et Commande D'un Système Hydrolienne

modulé est au niveau haut lorsque la modulante est supérieure à la porteuse et est au niveau bas lorsque la modulante est inférieure à la porteuse. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, figure II.17

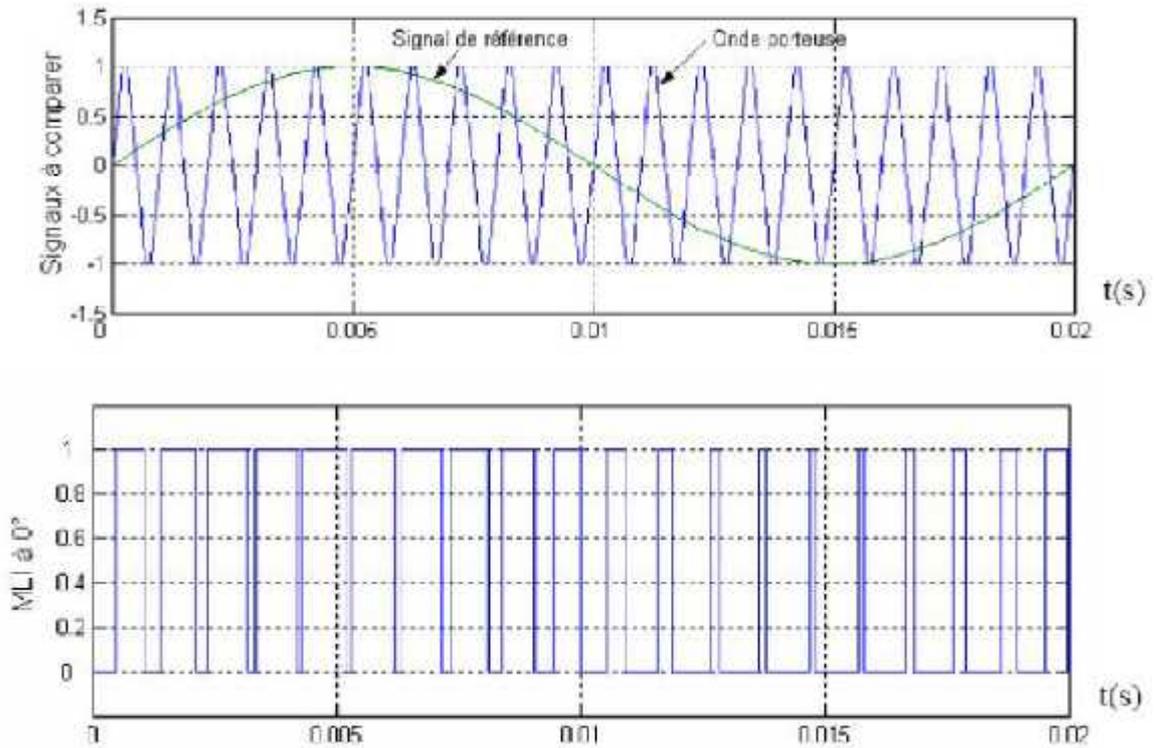


Figure II.17 Schéma de principe de la commande MLI.

Le modèle de la commande de la technique MLI sous Matlab/Simulink est représenté par la figure II.18.

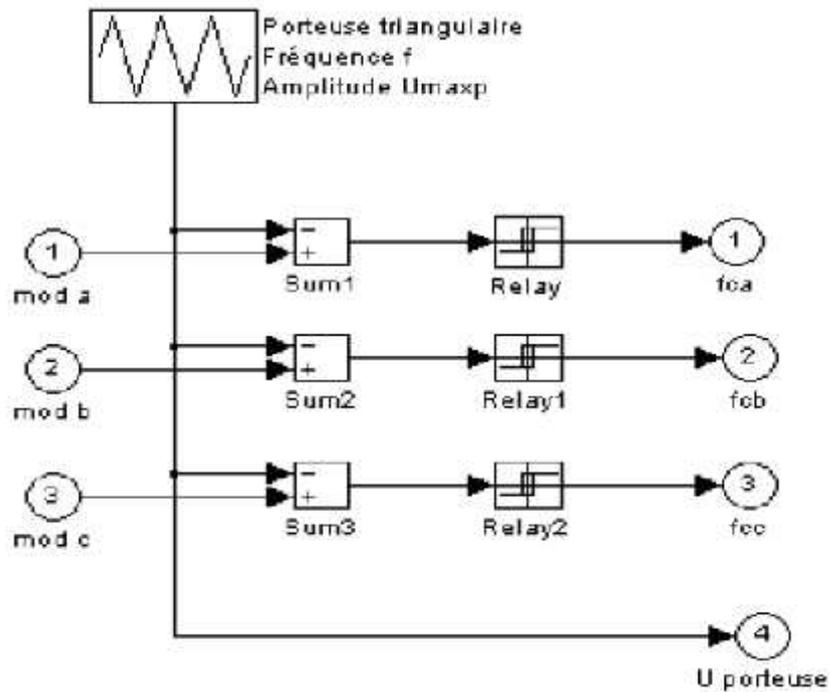


Figure II.18 Schéma bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink.

II.11 Contrôle des courants transiant dans le filtre RL

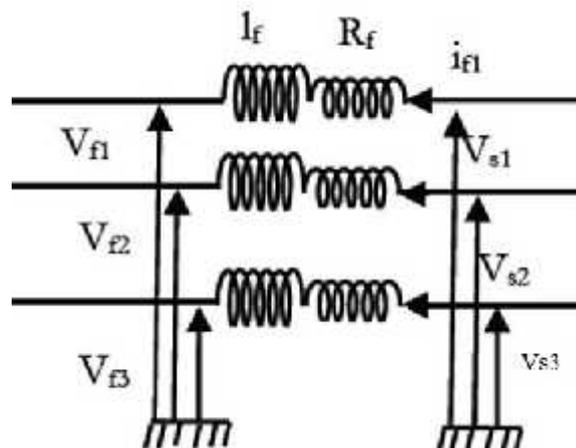


Figure II.19 Filtre côté réseau.

D'après la Figure II.19, nous pouvons écrire dans le repère triphasé, selon les lois de Kirchhoff, les expressions suivantes ^[26] :

$$V_{f1} = -R_{f1}I_{f1} - L_f \frac{di_{f1}}{dt} + V_{s1}$$

$$V_{f2} = -R_{f2}I_{f2} - L_f \frac{di_{f2}}{dt} + V_{s2}$$

$$V_{f3} = -R_{f3}I_{f3} - L_f \frac{di_{f3}}{dt} + V_{s3}$$

Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la partie mécanique d'une hydrolienne, modèle de multiplicateur de vitesse et de l'arbre de transmission. Dans la seconde partie on a élaboré une modélisation de la partie électrique de l'hydrolienne, telle que la machine asynchrone double alimentation (MADA). On a modélisé cette machine sur un repère tournant diphasée (d,q) à l'aide de la transformation de Park. On a aussi modélisé les convertisseurs statiques utilisés dans cette conversion d'énergie.

Cette modélisation nous a permis d'établir des schémas bloc qui seront utilisés pour le chapitre suivant, pour la simulation.

Chapitre 3
Simulation du système
globale

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons donné la modélisation de différentes composantes de la chaîne de conversion électrique, on a détaillé celui de la MADA et la commande utilisé pour une production optimale d'électricité.

Dans ce présent chapitre, on propose une simulation de la chaîne de conversion d'énergie du système hydrolienne globale. Les résultats de simulation numérique de comportement dynamique de système sont présentés pour justifier d'une part, les modèles mathématiques développés au chapitre précédent, et d'autre part, le bon fonctionnement du système ainsi que la compatibilité des résultats expérimentaux.

III.1 Schéma structurel

Nous faisons fonctionner l'ensemble du système hydrolienne de telle manière que la puissance fournie au réseau soit maximale. Le schéma structurel et représenté dans la figure III.1.

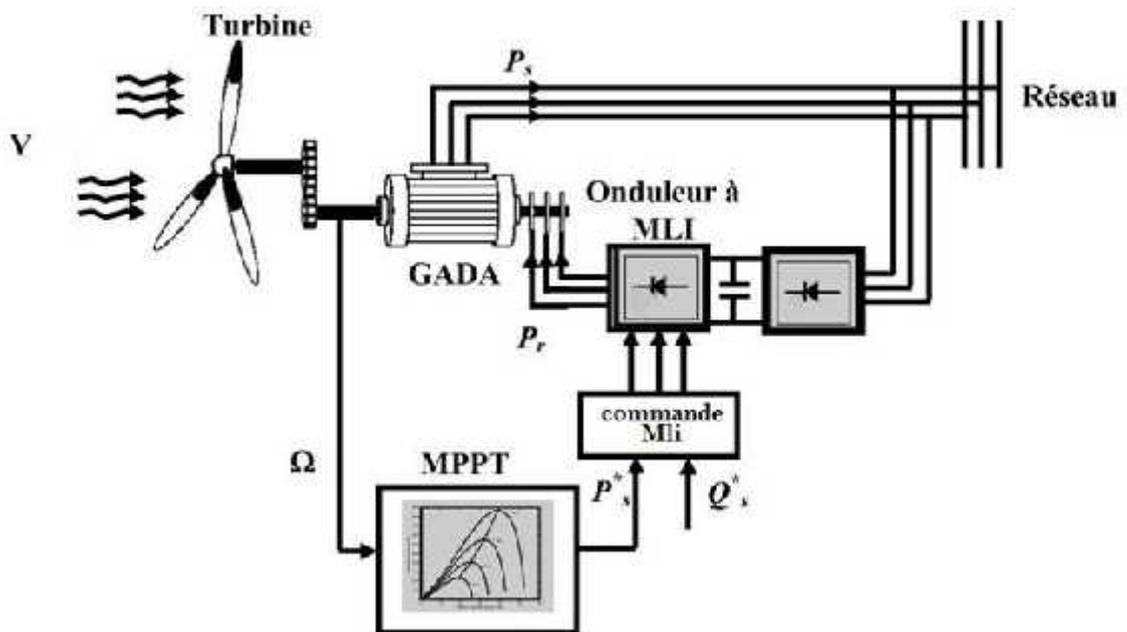


Figure III.1 Schéma structurel de la commande de système hydrolienne globale.

III.2 Résultats de la simulation

III.2.1 Profil de courant marin

Afin de montrer l'efficacité énergétique des commandes appliquées à l'ensemble turbine-génératrice, on applique un échantillon de vitesse du courant marin figure III.2.

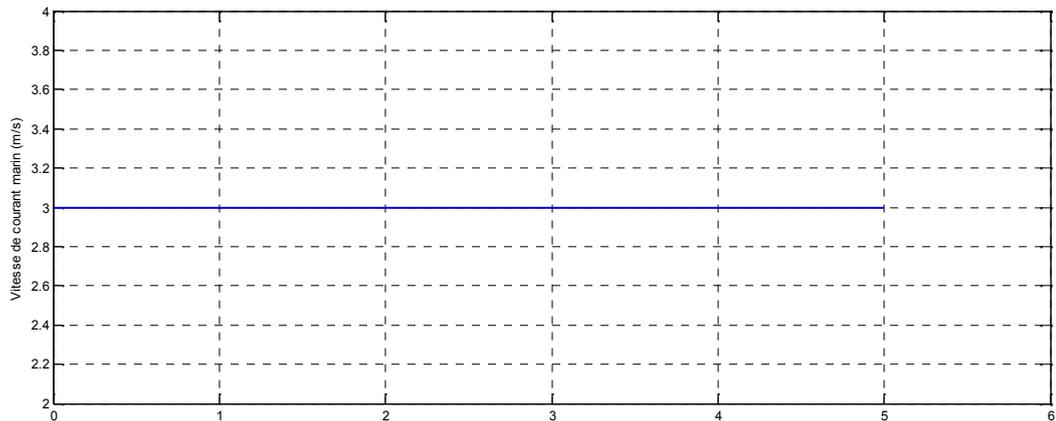


Figure III.2 Allure de la vitesse de courant marin.

III.2.2 Coefficient de puissance

L'évolution de coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque hydrolienne. Son évolution en fonction du temps comme le montre la figure III.3

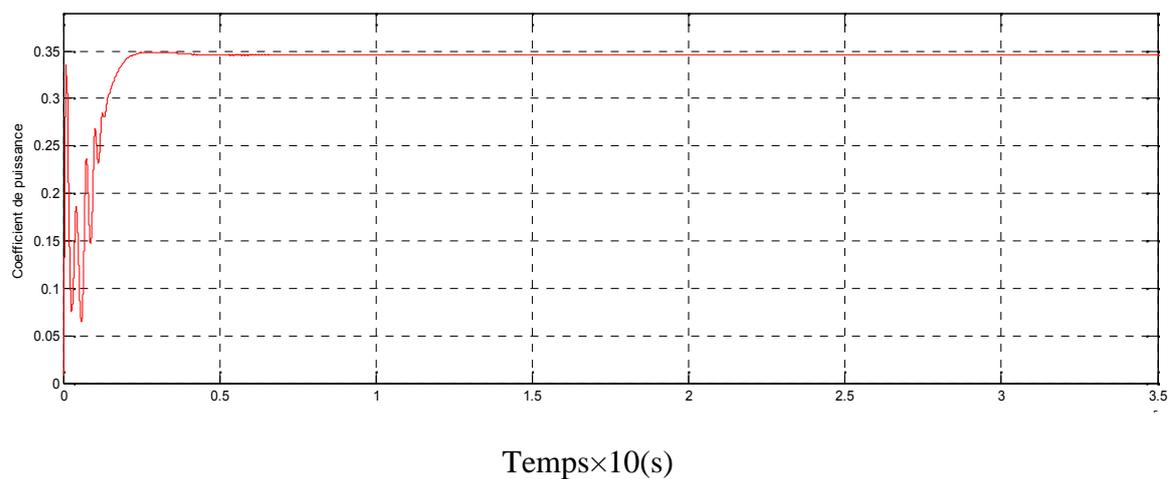


Figure III.3 Allure de coefficient de puissance de la turbine.

III.2.3 Vitesse mécanique de la turbine

La figure III.4 représente la vitesse mécanique de la turbine, qui dépend directement de la vitesse de courant marin.

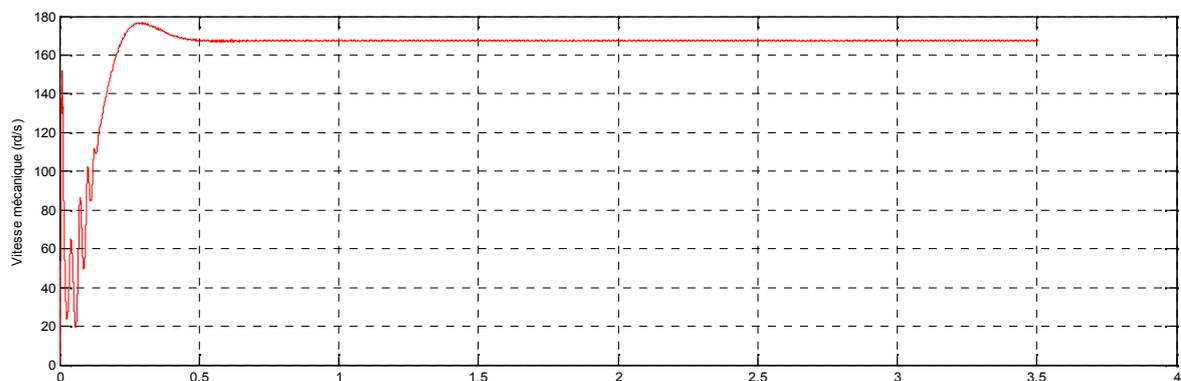


Figure III.4 La vitesse mécanique de la turbine.

III.2.4 Glissement de la génératrice

La figure III.5 illustre le glissement de la génératrice

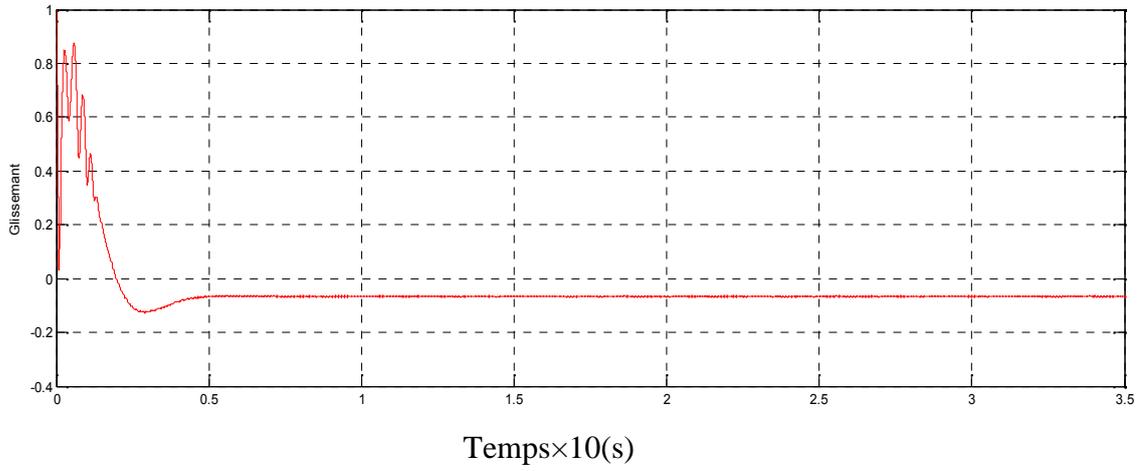


Figure III.5 Allure de glissement de la génératrice.

III.2.5 Puissance active

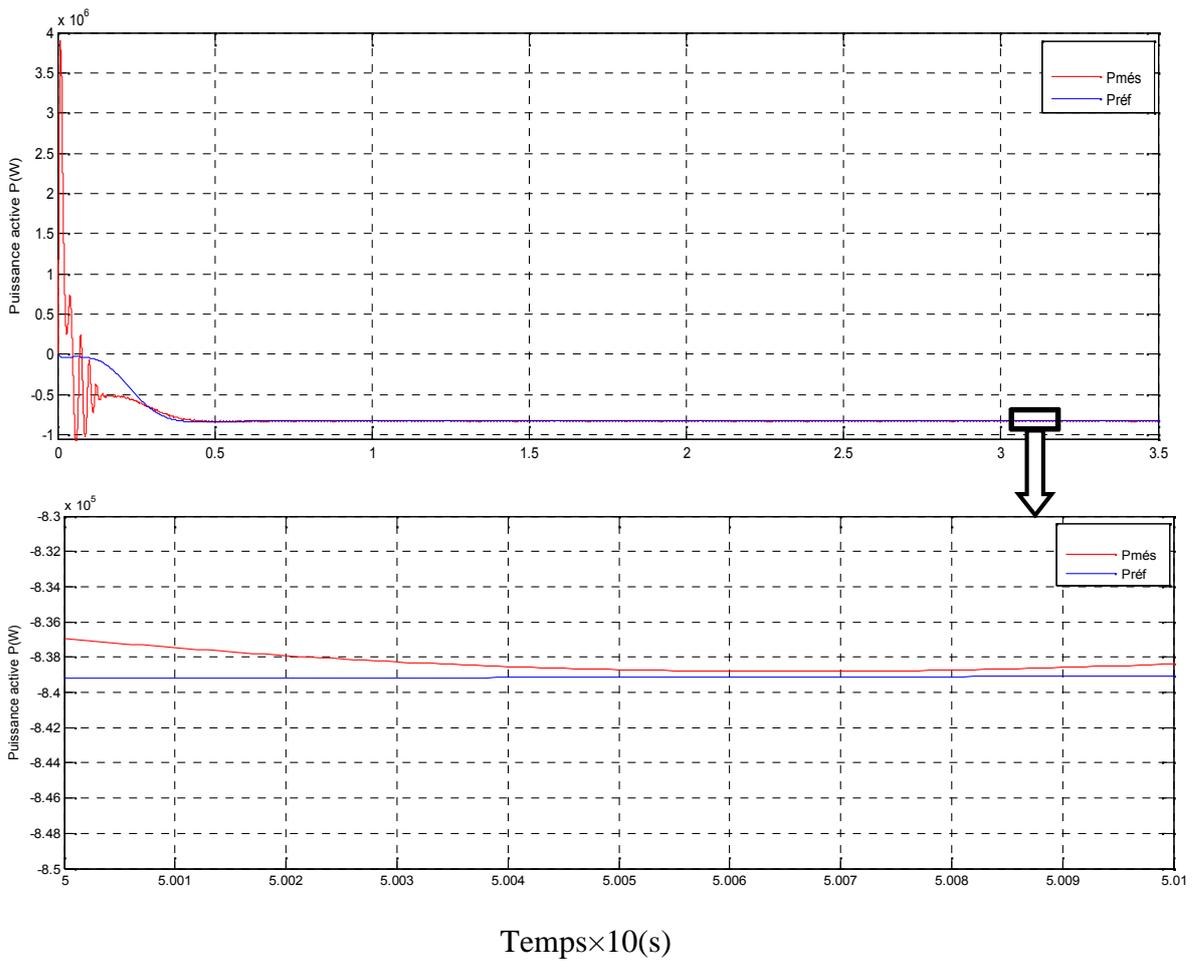


Figure III.6 Allure de la puissance active.

D'après l'allure de la figure III.6, on constate que la puissance $P_{més}$ suit la $P_{réf}$ qui est négative.

III.2.6 Puissance réactive

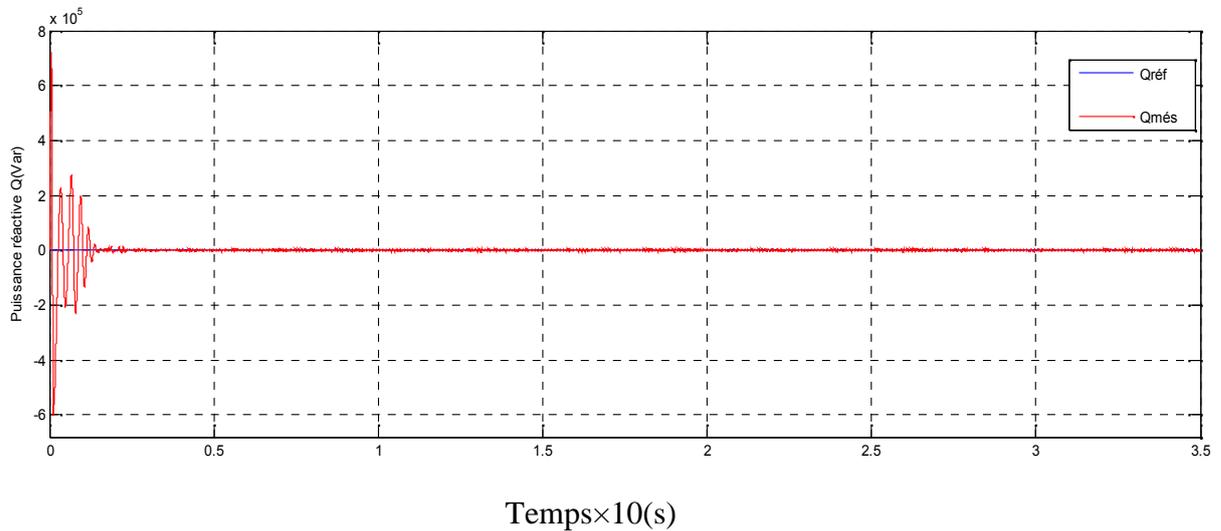


Figure III.7 Allure de la puissance réactive.

On constate d'après la figure III.7, que la puissance réactive $Q_{més}$ suit la puissance réactive $Q_{réf}$ qui est nul.

III.2.7 Courants rotoriques

La figure III.8 représente l'allure des courants rotoriques.

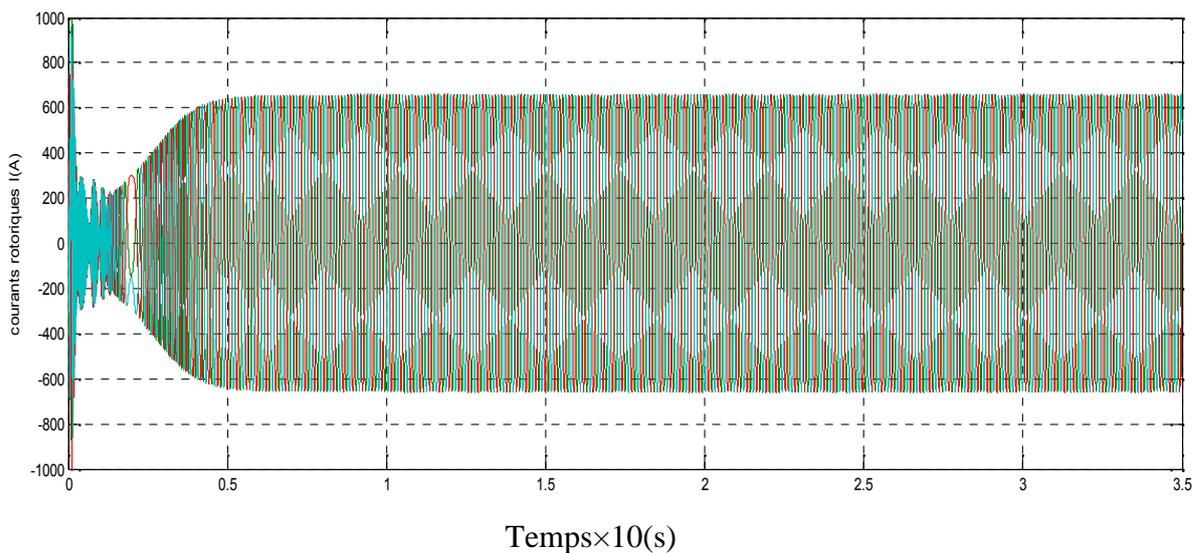


Figure III.8 courants rotoriques.

D'après l'allure de la figure III.9 on constate que la forme des courants rotoriques sont sinusoïdaux et de même fréquence.

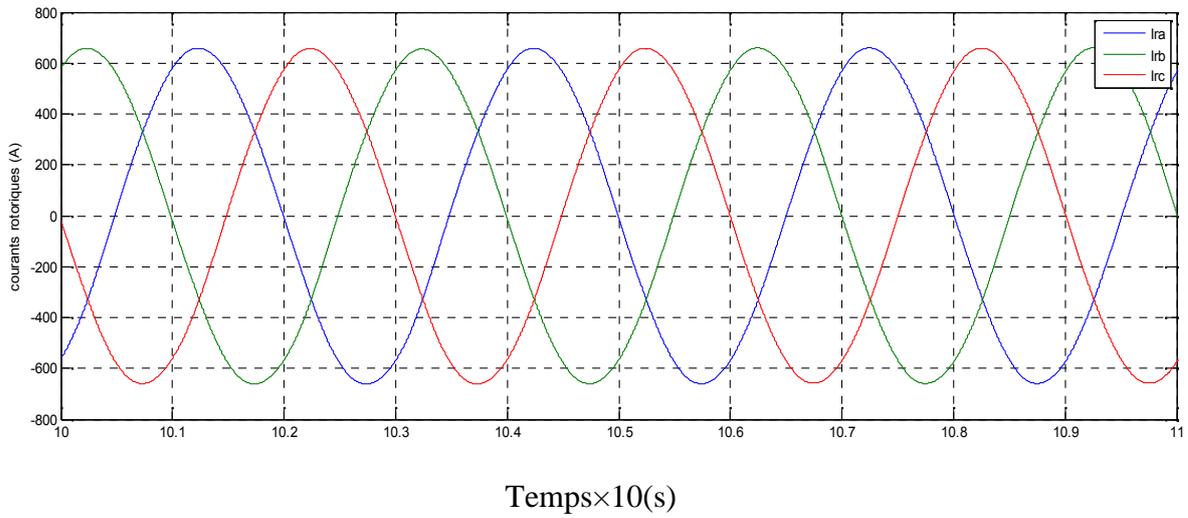


Figure III.9 Zoom sur les courants rotoriques.

III.2.8 Tension de bus continu

La tension du bus continu est montrée sur la figure III.10

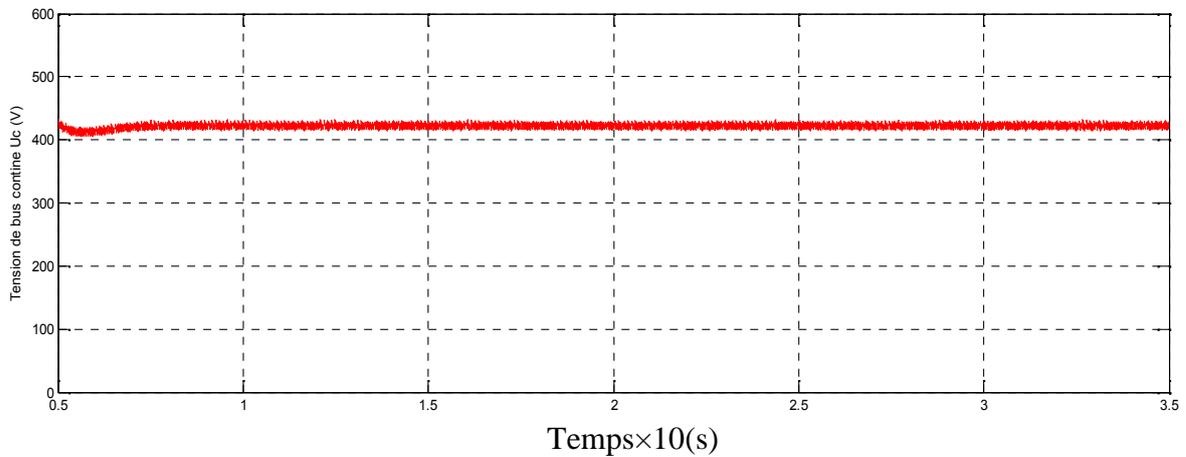


Figure III.10 Allure de tension du bus continu.

III.2.9 Couple électromagnétique

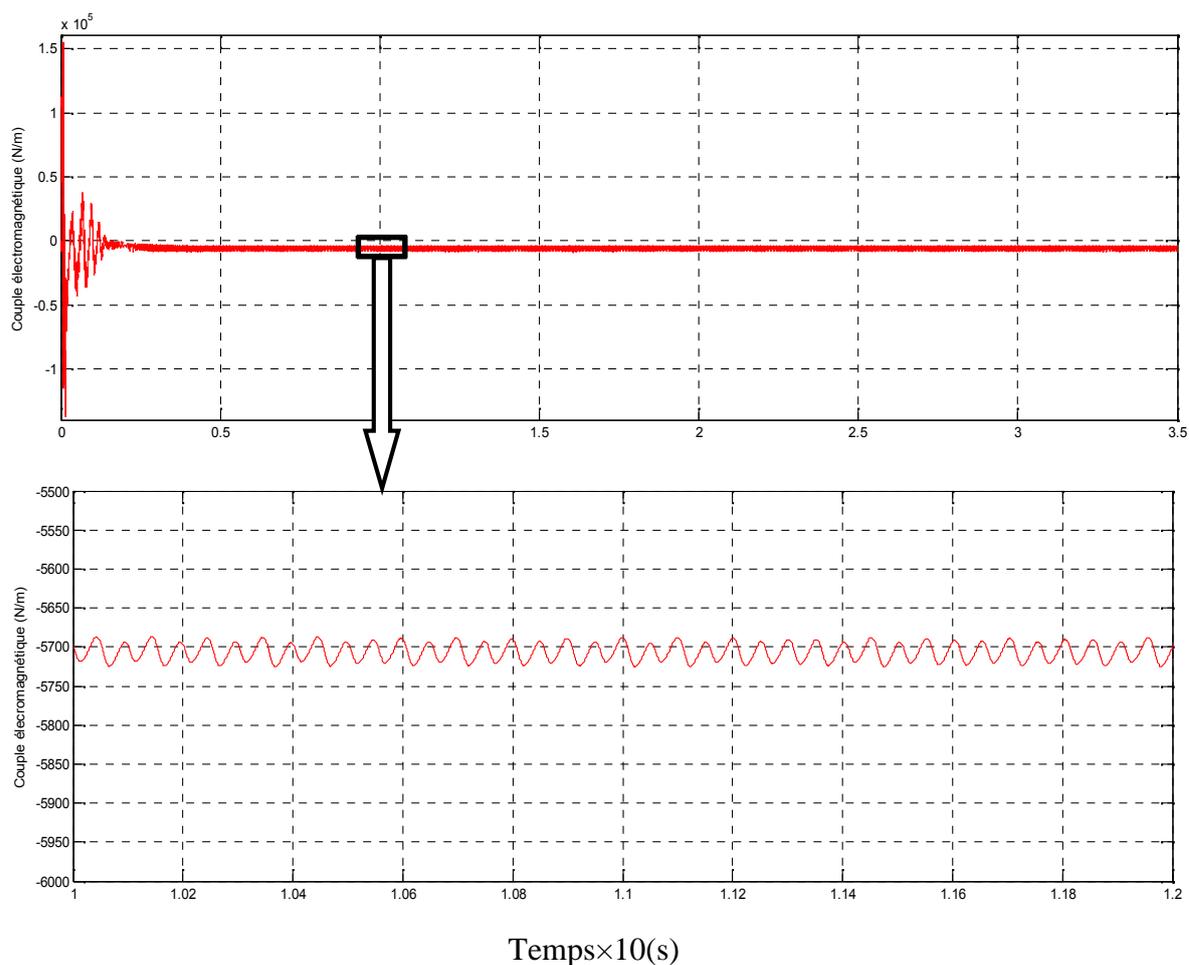


Figure III.11 Allure de couple électromagnétique.

Conclusion

Dans cette partie du travail on a simulé le modèle général proposé. On a procédé à des tests de simulation pour une vitesse du courant marin constante

Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème étude et simulation d'une machine asynchrone à double alimentation. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion hydrolienne constituée d'une turbine associée à une génératrice asynchrone. Cet ensemble de conversion de l'énergie hydrolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau ou la charge à alimenter. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie.

Pour ce faire, on a utilisé l'environnement Simulink/MATLAB. La modélisation et la commande à vitesse fixe ont été testées sur une hydrolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation de 0.1-MW.

Le premier chapitre a traité des généralités sur les systèmes hydroliennes. Dans ce contexte, quelques notions des différents types d'hydroliennes existant et leur mode de fonctionnement. Après avoir étudié les différents éléments qui constituent la chaîne de la conversion hydrolienne. Puis nous avons également traité les avantages et les inconvénients des hydrolienne.

Dans le chapitre deux, on a modélisé les différentes parties. On a vu l'intérêt de la transformation de Park, qui permet d'avoir un système d'équation différentielle à coefficients constants pour faciliter sa résolution, ainsi l'intérêt de l'orientation de flux qui sert à simplifier le modèle de la MADA. Et cette modélisation nous a permis d'aboutir à des schémas bloc qui seront exploités dans le dernier chapitre pour la simulation de système hydrolienne globale.

Le chapitre trois, a été consacré à la simulation sous Simulink/MATLAB de cette chaîne de conversion, afin de justifier les modèles mathématiques développés dans le chapitre deux. D'après les résultats de la simulation, on a une concordance totale avec les résultats théoriques, mis à part quelques perturbations dues au régulateur PI.

- [1] **Chul Hee Jo, Kang H. Lee, Jun H. Lee, C.Nichita**, “Multi-arrayed Tidal current energy farm and the integration method of the power Transportation”, Power Electronics, Electrical Drives, Automation And Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium.
- [2] **S.E Ben Elghali**, THESE “Modélisation et commande d’une hydrolienne Equipée d’une Génératrice Asynchrone à double alimentation”, décembre 2008.
- [3] **Ana Maria ANDREICA**, THESE “Optimisation énergétique de chaines de Conversion hydroliennes: modélisation, commandes et réalisations Expérimentales”, juillet 2009.
- [4] **Nesmat ABU-TABAK**, THESE “Stabilité des systèmes électriques multi Machines : modélisation, commande, observation et simulation” Novembre 2008.
- [5] **Whipple**, Les Courants marins, Amsterdam, Time-Life, coll. « La Planète terre », p 176 ,1984
- [6] **S.E. Ben Elghali et al.** “Les systèmes de génération d’énergie électriques à partir des courants de marée,” *Revue 3EI*, n°52, pp. 73-85, Mars 2008.
- [7][http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/mp/proceedings_pdf/presentations/1.%20co ntexte/ECRIN.pdf](http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/mp/proceedings_pdf/presentations/1.%20co%20ntexte/ECRIN.pdf)
- [8] **Ana Maria ANDREICA** «Optimisation énergétique de chaînes de conversion hydroliennes– modélisation, commandes et réalisations expérimentales » T H ESE pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L’Institut Polytechnique de Grenoble, le 16 juillet 2009.
- [9],[10] <http://ashdelf.e-monsite.com/pages/different-types-d-hydroliennes.html>
- [11]**B.G. Newman**, ‘Actuator Disc Theory for Vertical Axis Wind Turbines’, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp. 347 - 355, 1983.

[12] **B.G. Newman**, ‘Actuator Disc Theory for Vertical Axis Wind Turbines’, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp. 347 - 355, 1983.

[13] <http://www.ifremer.fr/lpo/cours/maree/forces.html>

[14] <http://www.enseeiht.fr/hmf/travaux/CD9899/travaux/optsee/hym/info/hym.htm>

[15] **I. Etxeberria-Otadui, A. López de Heredia, H. Gaztañaga, S. Bacha and R. Reyero**, ‘A Single Synchronous Frame Hybrid (SSFH) Multi-Frequency Controller for Power Active Filters’, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, N°5, pp. 1640 – 1648, 2006.

[16] **I. Etxeberria-Otadui, U. Viscarret, M. Caballero, A. Rufer and S. Bacha**, ‘New Optimized PWM VSC Control Structures and Strategies under Unbalanced Voltage Transients’, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 54, N°5, pp. 2902 – 2914, 2007.

[17], [18] **S.taraft** «étude du stockage inertiel d’énergie dans une chaine de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation», diplôme de magister, Université A/MIRA de Bejaïa, 2008.

[19],[20] **A.Blkaid** «optimisation de la commande des convertisseurs statiques dans le cas de la production d’énergie électrique », mémoire de Magister, université de béjaia, 17 novembre 2004.

[21] **K.SEDDIK ET M.CHOUAIB**, « réglage des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone par des régulateurs en mode de glissant », thèse d’ingénieure université Med Boudiaf de M’sila ,2005.

[22] **G. SALLOUM** « Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation» thèse présentée pour obtenir le titre de docteur du l’institut national polytechnique de Toulouse. Le 13 Mars 2007.

[23] , [24], [25] **A. Boyette** «contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec de système de stockage pour la production éolienne »thèse de doctorat de l'université de Poincaré, Nancy 1,2006.

[26] **B. Farid** «Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle» Thèse présentée pour obtenir le grade de Doctorat En Sciences En Electrotechnique de l'Université de Batna, 2009.

*Annexe***Paramètres de la MADA**

- Puissance nominale : 0.9 MW
- Nombre de pair de pôles p : 2 paires de pôles.
- Résistance d'enroulement statorique R_s : 0.012 Ω
- Résistance d'enroulement rotorique R_r : 0.021 Ω
- Inductance cyclique statorique L_s : 0.013732 H
- Inductance cyclique rotorique L_r : 0.013703 H
- Inductance magnétisante M : 0.013528 H

Paramètres de la turbine

- Rayon de l'hélice : R= 10 m
- Nombre de pales : P= 3
- Gain de multiplicateur de vitesse : G= 90
- Inertie totale : J= 50 kg/m²
- Coefficient de frottement visqueux : f= 0.0024 N ms/rd
- Masse volumique de l'eau : ρ = 1024 kg/m³

Paramètres de bus continu

- Valeur de la capacité : C= 400 μ F
- Valeur de l'inductance de lissage : L= 0.5 H

Paramètres de réseaux

- Valeur de la tension efficace : v= 690 V
- Valeur de la fréquence : f= 50 Hertz