

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



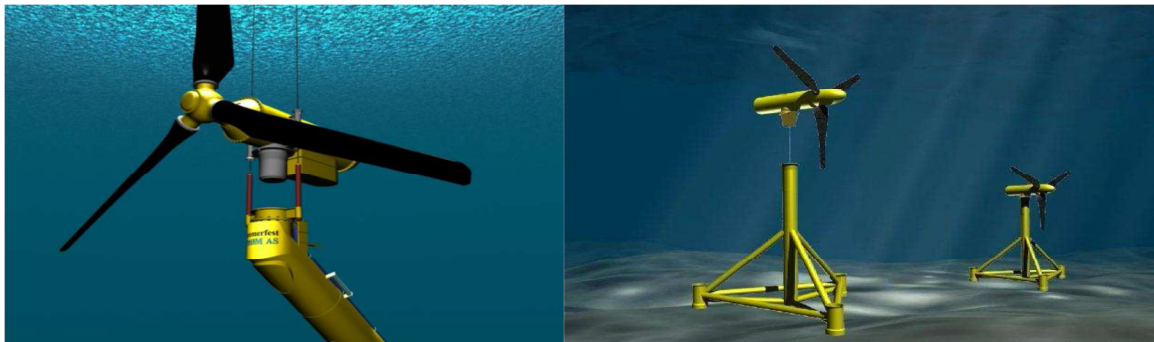
جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

*En vue de l'obtention du diplôme de master  
en électrotechnique*

OPTION : Energie Renouvelable

*Stratégie de contrôle d'une hydrolienne en cas de creux de  
tension*



Réalisé par :

-BEKOUICHE Faouzi

-ZIDANE Noredine

Jury par :

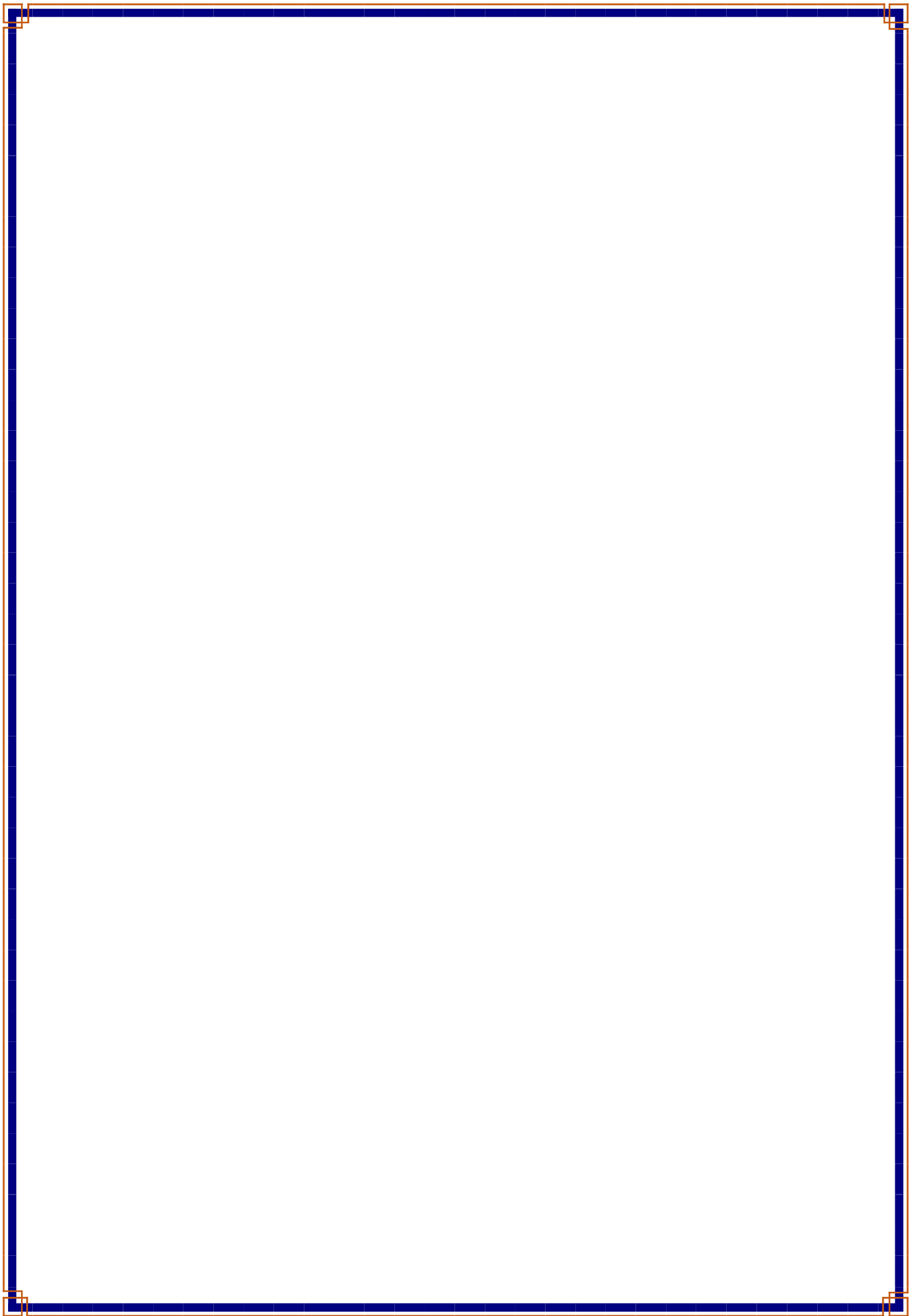
-OUARI K

-BOUDRIASSE Z

Encadré par :

M<sup>r</sup>: -BEKKA Hakime

*Promotion 2015-2016*



## ***REMERCIEMENTS***

*Rendons grâce à dieu qui nous à éclairer et nous a donné l'abnégation nécessaire pour l'achèvement de notre travail.*

*Ce travail n'allait pas prendre sa forme finale sans l'assistance de plusieurs personnes ; Qu'elles trouvent à travers ces modestes lignes l'expression de nos sincères reconnaissances.*

*Nos remerciements les plus profonds et les plus sincères s'adressent à notre promoteur Mr Hakim BEKKA pour nous avoir guidés pas à pas dans notre progression.*

*Ses encouragements, remarques, conseils et suggestions nous ont énormément aidés durant la réalisation de ce projet.*

*Nous remercions les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Enfin nos vifs remerciements sont adressés à toutes personnes ayant apporté un plus de prés ou de loin à l'élaboration du présent travail*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Un remerciement particulier à mes très chers parents, à mes chers frères et sœurs.*

*A toute ma famille,*

*A Tous ceux qui me sont chers.*

*A tous mes amis(es), plus particulièrement, à ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail. Et à tous la promotion d'énergie Renouvelable.*

*BEKOUCHE 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*

*A mes chères sœurs*

*A mes frères*

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

*Disponibilité*

*A tous mes amis et met camarades*

*A la promotion master 2, Electrotechnique, cession 2015/2016*

*A mon binôme*

*Sans oublier tous 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.*

ZIDANE NOREDINE

## Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Introduction générale

### ***Chapitre I : Généralités sur les systèmes hydroliens***

I.1 Introduction .....	01
I.2 Histoire de hydrolienne .....	02
I.3 Le potentiel énergétique hydrolien dans monde .....	02
I.4 Energie hydrolienne et la production de l'énergie électrique .....	03
I.5 Principe de fonctionnement et éléments constitutifs d'une l'hydrolienne .....	04
I.5.1 Principe de fonctionnement d'une l'hydrolienne .....	04
I.5.2 Composition d'une hydrolienne .....	05
I.6 Classification des hydroliennes .....	05
I.6.1 Première classification (suivant la technologie) .....	06
I.6.1.1 Les hydroliennes à axe horizontal .....	06
I.6.1.2 Les hydroliennes à axe vertical.....	06
I.6.1.3 La technologie à aile battante ou oscillante .....	07
I.6.1.4 Les hydroliennes utilisant une roue à aubes flottantes .....	07
I.6.2 Deuxième classification .....	08
I.6.2.1 Mode libre.....	08
I.6.2.2 Mode canalisé (effet Venturi) .....	08
I.7 Comparaison entre la production éolienne et des hydroliennes .....	09
I.7.1 La densité de l'eau.....	09

I.7.2 La vitesse incidente du courant .....	09
I.7.3 La surface balayée par le rotor .....	09
I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie hydrolienne.....	10
I.9 L'utilisation actuelle des hydroliennes.....	11
I.10 Maintenance des hydroliennes .....	12
I.11 Modélisation de la Ressource.....	13
I.11.1 Puissance maximale extraite .....	13
I.11.1.1 La loi de Betz.....	13
I.11.1.2 La limite de Betz.....	14
I.11.1.3 Potentiel de la ressource .....	15
I.12 Stratégie de maximisation et de limitation de la puissance .....	16
I.13 Mode de fonctionnement.....	18
I.13.1 Fonctionnement à vitesse fixe .....	18
I.13.1.1 Avantages .....	18
I.13.1.2 Inconvénients.....	18
I.13.2 Fonctionnement à vitesse variable .....	18
I.13.2.1 Avantages .....	18
I.13.2.2 Inconvénient .....	19
I.14 Convertisseurs électromécaniques .....	19
I.14.1 Machine synchrone à aimant permanent .....	19
I.14.2 Machine asynchrone à double alimentation .....	20
I.14.2.1 Structure avec redresseur à diode et contrôleur de glissement.....	21
I.14.2. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	21
I.15 Les creux de tension.....	22

I.15.1	Caractérisation des creux de tension .....	24
I.16	Conclusion.....	24
 <b>Chapitre II : Modélisation et commande de système hydrolienne</b>		
II.1	Introduction.....	26
II.2	Présentation du système a étudié .....	26
II.3	Modélisation de la partie mécanique .....	26
II.3.1	Modélisation de la turbine.....	26
II.3.2	Modélisation du multiplicateur de vitesse .....	28
II.3.3	Modélisation de la transmission.....	29
II.3.4	Modélisation de l'arbre de transmission .....	29
II.3.5	Schéma bloc du modèle de la turbine hydrolienne .....	30
II.4	Stratégies de commande de la turbine hydrolienne .....	31
II.5	Maximisation de la puissance extraite .....	31
II.5.1	Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique .....	31
II.6	Modélisation de la partie électrique.....	33
II.6.1	Structure de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) .....	33
II.6.2	Fonctionnement de la MADA en génératrice .....	34
II.7	Modélisation de la MADA .....	35
II.7.1	Hypothèses simplificatrices .....	35
II.7.2	Modèle de la MADA dans le repère abc.....	35
II.7.2.1	Equations électriques.....	35
II.7.2.2	Equations magnétiques.....	37
II.7.3	Modèle de la MADA dans le repère de Park .....	38
II.7.3.1	Transformation de Park.....	38



II.7.3.1.1 Equations électriques .....	39
II.7.3.1.2 Equations magnétiques .....	40
II.7.3.1.3 Equation mécanique .....	40
II.8 Modèle de la MADA en vu de la commande .....	41
II.8.1 Commande vectorielle .....	41
II.8.2.1 Relations entre puissance statorique et courants rotoriques.....	42
II.8.2.1 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	43
II.9 Modélisation des convertisseurs statiques .....	44
II.9.1 Modélisation du redresseur MLI.....	45
II.9.2 Modélisation du filtre de bus continu .....	45
II.9.3 Modélisation de l'onduleur MLI.....	46
II.9.4 Commande MLI des convertisseurs.....	48
II.10 Conclusion .....	49

### **Chapitre III : Simulation du système globale**

III.1 Introduction .....	50
III.2 Simulation du système hydrolien global .....	50
III.3 Profil du courant marin (constant).....	50
III.3.1 Coefficient de puissance .....	51
III.3.2 La vitesse mécanique de la turbine .....	51
III.3.3 Glissement de la génératrice .....	51
III.3.4 La puissance active .....	52
III.3.5 La puissance réactive .....	52
III.3.6 Courants rotoriques.....	53
III.3.7 Couple électromagnétique .....	54

III.3.8 Tension de bus continu .....	54
III.4 Profil du courant marin.....	55
III.4.1 Coefficient de puissance .....	55
III.4.2 La vitesse mécanique de la turbine.....	55
III.4.3 La puissance active .....	56
III.4.4 La puissance réactive .....	56
III.4.5 Glissement de la génératrice .....	56
III.4.6 Courants rotoriques.....	57
III.4.7 Tension de bus continu .....	57
III.5 Creux de tension .....	57
III.5.1 La vitesse mécanique de la turbine .....	58
III.5.2 Puissance active et réactive.....	58
III.5.3 Courants rotoriques.....	60
III.5.4 Couple électromagnétique .....	60
III.5.5 Tension de bus continu .....	61
III.6 Conclusion .....	62
Conclusion générale	
Bibliographique	
Annexes	
Listes des figures	
Liste des symboles et abréviations	

### Introduction générale

L'épuisement des ressources énergétiques fossiles, les problèmes environnementaux causés par l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques, en Asie en particulier, ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons est nécessaire. Pour cela des ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées.

Parmi elles, nous pouvons citer l'énergie issue du nucléaire, qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, mais les risques d'accident liés à leur exploitation auraient des conséquences désastreuses, s'ajoute à ceci le coût du traitement des déchets, issus de ce mode de production. De plus, l'accès à cette ressource aux pays en voie de développement nécessite des investissements lourds et un très grand niveau de technicité. Une autre alternative, consiste à exploiter les énergies renouvelables, qui offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et d'une manière abondante.

Les énergies marines peuvent contribuer à une part significative des nouvelles sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre. Leur exploitation raisonnée permet de produire de l'électricité exportable à terre. Ces énergies renouvelables théoriquement exploitables sont nombreuses et variées. En effet, la mer est un fluide riche en flux énergétiques qui peuvent être exploités sous diverses formes. On peut citer par exemple, les énergies thermiques, hydrocinétiques (vagues et courants) et osmotiques.

Le développement de la plupart de ces énergies connaît plusieurs difficultés d'ordre économique et technologique qui sont dues essentiellement aux nombres réduits de zones économiquement exploitables et aux coûts élevés des techniques proposées. Cependant, l'énergie hydrocinétique des courants de marée que l'on peu récupérer grâce à des machines appelées hydroliennes, connaît un intérêt considérable par les chercheurs et les industriels vu la grande similarité des technologies utilisées avec les éoliennes. Les systèmes hydroliens se développent ainsi plus rapidement car on peut désormais s'appuyer sur des techniques fiables et éprouvées.

Il est cependant à noter que dans ce domaine, aucune technologie de référence n'a encore émergé et que l'on constate à l'examen des projets actuels un foisonnement de technologies diverses.

Le présent mémoire décrit une étude sur un système de conversion hydrolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA), cette génératrice permet une production de l'énergie électrique à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources hydroliennes pour les différentes vitesses des courants marins.

L'objectif de ce travail est l'étude, la modélisation et la simulation d'une hydrolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (avec et sans creux tension). C'est un travail qui est réparti 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 présenter les grandes familles des machines utilisées dans les systèmes de conversion électromécanique, particulièrement la machine asynchrone à double alimentation .On finira par donner la définition et caractéristique d'un creux de tension, son application et son intérêt.

Le second chapitre est consacré à la modélisation et commande d'un système hydrolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation.

Le dernier chapitre présente les résultats de simulation lors de l'apparition d'un creux de tension d'une parte lors de variations fortes des courants d'autre part.

# *Chapitre I*

## *Généralités Sur Les Hydroliennes*

## I.1 Introduction

Les océans couvrent plus de 70% de la surface du globe terrestre et sont le siège d'une importante quantité de sources d'énergie. L'extraction de l'énergie de ces sources connaît des problèmes d'ordre technologique et économique, dus aux difficultés liées à l'implantation des systèmes de production dans le milieu marin et au transport de l'énergie produite sur la terre ferme. Le nombre réduit de zones potentiellement et économiquement exploitables associé aux coûts élevés des techniques de production actuelle font que la vulgarisation de ces formes d'énergie a pris un énorme retard par rapport à l'énergie éolienne. Cependant, l'une de ces sources d'énergie, celle liée aux courants de marée, est devenue le centre d'intérêt de plusieurs chercheurs et industriels à cause de sa grande prédictibilité et de son énorme potentiel estimé à une puissance de 100 GW. La France possède la deuxième réserve européenne, derrière le Royaume Uni, répartie entre le Raz Blanchard (3 GW), Fromveur (2 GW) et le Raz de Sein (1 GW) [1]. Les hydroliennes qui captent une partie de l'énergie cinétique de ces courants de marée, produisent de l'énergie électrique suivant le même principe que les éoliennes. 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. Leur technologie évolue rapidement car elles peuvent s'appuyer sur les données océanographiques fiables et sur les techniques performantes obtenues avec les éoliennes. Par ailleurs, l'eau de mer est plus dense que l'air, ce qui permet aux hydroliennes de produire environ 800 fois la puissance d'une éolienne pour les mêmes dimensions et conditions de fonctionnement (même vitesse de la ressource, même rendement de conversion) [2].

Dans ce chapitre, nous ferons un bref rappel des différentes formes d'énergie marine et plus particulièrement celles issues des courants de marée. Les hydroliennes seront classées suivant leur technologie et leur mode de fonctionnement à vitesse fixe ou variable sera étudié. De plus, la stratégie de maximisation de la puissance extraite sera présentée en fonction de la vitesse de marée. Enfin, les convertisseurs d'énergie électriques utilisés dans les technologies hydroliennes seront étudiés ainsi que leur mode de couplage au réseau électrique.

## I.2 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<sup>ème</sup> siècle. Dans l'ouvrage de Alberge 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 Do élan, en Bretagne, au printemps 1979 avec un prototype dont le rotor avait une aire de 7 m<sup>2</sup>. La hauteur de la houle étant de 80 centimètres, les expérimentateurs récupérèrent une puissance de 3 kW.

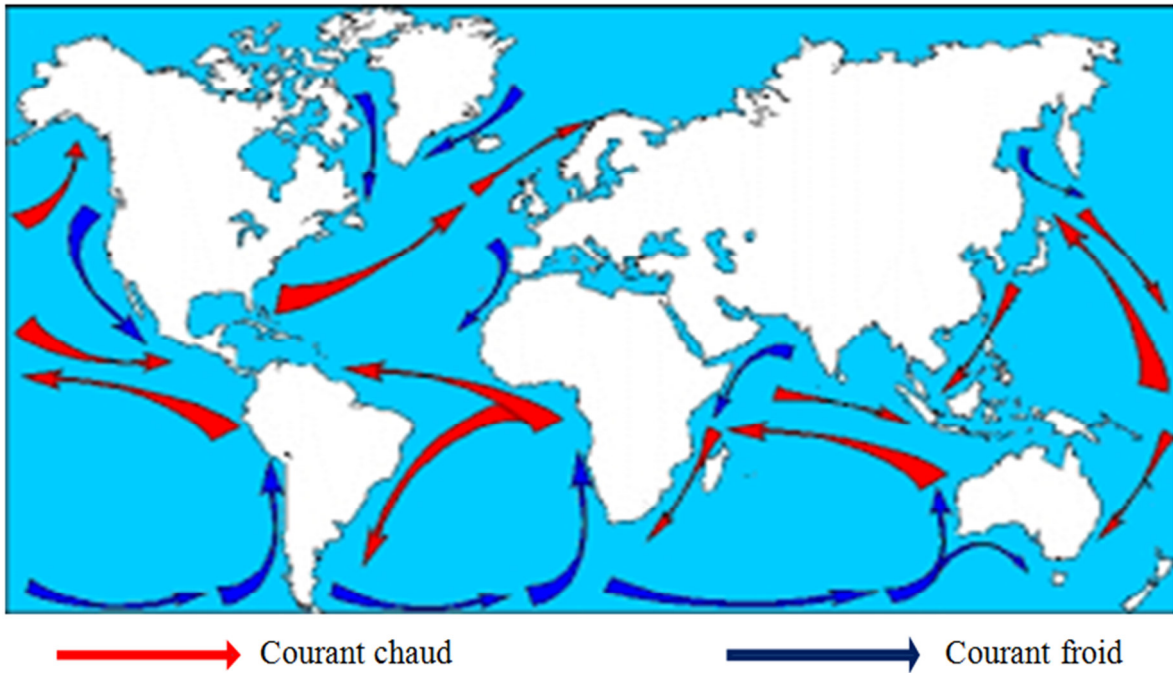
La première hydrolienne commerciale a été implantée en Irlande du Nord (1,2 MW) en avril 2008. De nombreux autres projets sont en développement aujourd'hui, notamment en France et au Royaume-Uni, qui rassemblent 80 % du potentiel européen. La technique utilisée est relativement connue (proche d'une éolienne), son développement ne devrait donc requérir que du progrès technologique incrémental [3].

## I.3 Le potentiel énergétique hydrolien dans monde

Les emplacements des hydroliennes sont déterminés par les types des courants, et leurs positions géographiques. On peut distinguer deux types :

Les courants de surface et les courants de profondeur. Ils sont déterminés par des différences de température (mais aussi de salinité). La différence de densité entre les eaux plus ou moins chaude (et plus ou moins salées) font que les eaux froides et salées plongent en profondeur, tandis que les eaux chaudes et douces restent en surface. Les courants sont connectés entre eux, et forment une boucle à travers les océans. Ils ont pour rôle de réguler les climats et de transporter la chaleur à travers le monde. Comme deux sous catégories de courants, on distingue les courants marins (situés en plein mer, au large) et les courants de marées (située, au contraire, près des côtes et à l'embouchure des fleuves). Ce sont ces différences qui vont déterminer l'emplacement des hydroliennes. Les principales causes des courants sont le rayonnement solaire, les vents et la pesanteur. Les flux des courants océaniques sont mesurés en Sverdrup (équivalent à 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s ou 0,001 km<sup>3</sup>/s) [4].

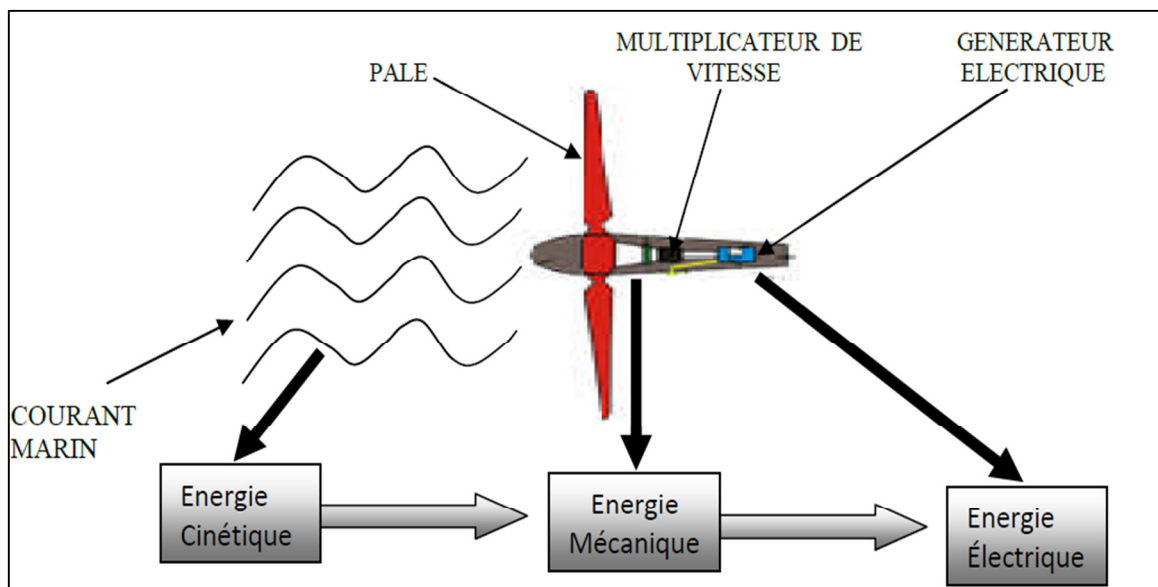
Tous les courants de surface peuvent être exploités, voici la carte des courants marins, Voir la Figure (I.1)



**Figure I.1 :** Potentiel énergétique hydrolienne dans le monde

#### I.4 Energie hydrolienne et la production de l'énergie électrique

Une hydrolienne est une turbine sous-marine (ou subaquatique, ou posée sur l'eau et à demi-immergée) qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou de cours d'eau, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air. La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, qui est alors transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure I.2) [5].



**Figure I.2 :** Conversion de l'énergie cinétique du courant marin



## I.5 Principe de fonctionnement et éléments constitutifs d'une l'hydrolienne

### I.5.1 Principe de fonctionnement d'une l'hydrolienne

Pour utiliser l'énergie des courants marins, il faut utiliser des méthodes dérivées de celles qu'utilise l'énergie du vent (éoliennes). Ces machines s'appellent des hydroliennes.

On retrouve en effet dans les racines étymologiques des hydroliennes et des éoliennes le même suffixe -ienne qui montre bien que le principe est le même. Le préfixe quant à lui permet d'identifier la nature de l'élément utilisé pour produire cette énergie.

On a Éole- pour l'énergie du vent et hydro- pour l'énergie de l'eau. Le principe consiste donc à faire tourner des hélices ou des turbines par les courants marins. Chaque hydrolienne a une structure à peu près semblable : elle est composée d'une base qui permet de la fixer au sol.

**Le rotor** : qui tourne avec l'énergie cinétique des courants marins. Ce rotor entraîne alors un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Enfin l'électricité produite est envoyée sur terre par des câbles.

**Les hélices** : d'une hydrolienne fonctionnent exactement comme celles d'un avion, mais au lieu que ce soit elles qui fassent subir, c'est elle qui subit. En effet, grâce au profilage de celle-ci, Ainsi l'hélice est poussée par la surpression et est aspirée par la dépression : l'hélice tourne.

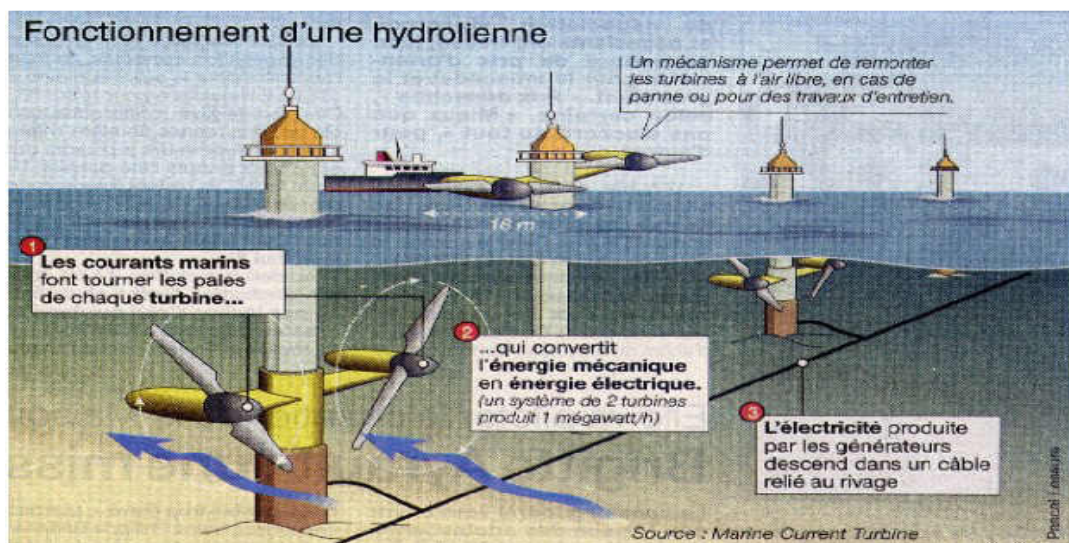


Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une hydrolienne [6]

### I.5.2 Composition d'une hydrolienne

Généralement, une hydrolienne est composée de : [6]

- **Le mât ou ancre** : Il permet de fixer l'hydrolienne sur le fond marin.
- **La turbine** : Portant plusieurs pales (deux à dix), elle capte l'énergie cinétique et se met en rotation sous l'effet des courants de rotation.
- **Le générateur** : Il est composé de :
  - ❖ Le moyeu : C'est l'axe sur lequel sont fixées les pales. Il est conçu de manière à tourner toujours dans le même sens de rotor.
  - ❖ L'alternateur : C'est le générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
  - ❖ Le flotteur : C'est un élément réglable permettant d'obtenir un meilleur rendement
  - ❖ Le stabilisateur : C'est le système qui permet à l'hydrolienne d'extraire l'énergie dans les deux sens.

Ces éléments constitutifs de l'hydrolienne sont illustrés sur la figure ci-dessous.

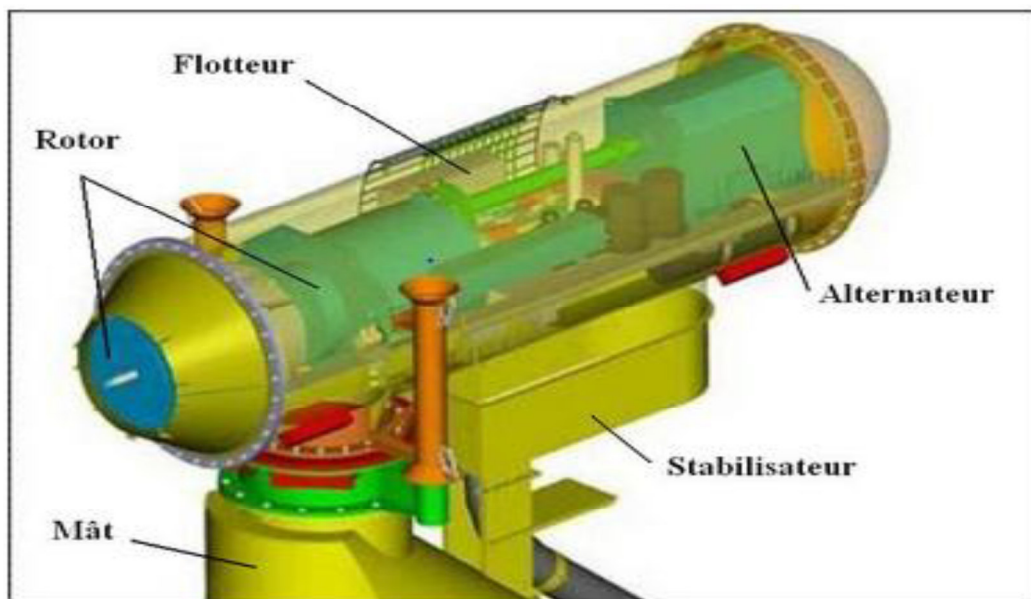


Figure I.4 : Composants d'un générateur hydrolien

### I.6 Classification des hydroliennes

Suivant la technologie et le mode d'extraction, on peut classer les hydroliennes en deux grandes catégories : [6].

**I.6.1 Première classification (suivant la technologie)**

Tout comme les éoliennes, les hydroliennes peuvent être à axe horizontal ou vertical. Cependant, d'autres technologies ont été développées afin de mieux extraire l'énergie marine de certains sites. Suivant la technologie et le mode d'immersion, ces hydroliennes peuvent être classées comme suit :

**I.6.1.1 les hydroliennes à axe horizontal**

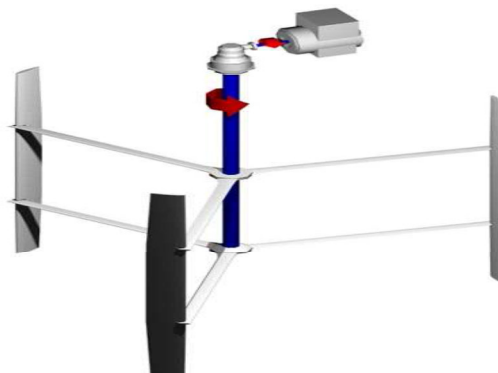
Se rapprochent le plus de la technologie éolienne. Ces hydroliennes, généralement bipales ou tripales sont fixées sur le fond marin à l'aide d'un pieu et leur profondeur d'implantation est estimée à quelques dizaines de mètres (inférieure à 100m). L'atout majeur de cette technologie est son meilleur rendement de conversion par rapport aux autres.



**Figure I.5 :** Hydrolienne à axe horizontal

**I.6.1.2 Les hydroliennes à axe vertical**

Sont constituées d'une plateforme flottante contenant un générateur entraîné par une turbine tripale. L'avantage d'un tel système est son indépendance vis-à-vis du sens du courant et son inconvénient réside dans le phénomène de cavitation qui agit sur toute la pale.



**Figure I.6 :** Hydrolienne à axe vertical

### I.6.1.3 La technologie à aile battante ou oscillante

Est généralement un trépied fixé sur le fond marin dont les pales font face aux courants. Les oscillations du bras entraînent le pompage du fluide pour générer de l'énergie électrique. Le principal avantage de ce système est l'absence quasi-totale du risque de cavitation dû à la forme des pales. Le pompage du fluide alimente un moteur hydraulique qui est couplé au générateur électrique, par conséquent, l'inconvénient d'un tel système est qu'en plus du générateur il faut obligatoirement un moteur hydraulique.



**Figure I.7 :** La technologie à aile battante ou oscillante

### I.6.1.4 Les hydroliennes utilisant une roue à aubes flottantes

Sont très proches de la forme conventionnelle des moulins à eaux. À mi immergées, elles sont équipées d'un cylindre étanche qui tourne sous l'effet des courants. Ce mouvement entraîne un générateur électrique qui peut être placé soit sur le côté soit à l'intérieur du cylindre. L'atout principal de cette hydrolienne est sa simplicité, son faible coût et sa facilité de maintenance par rapport aux hydroliennes totalement immergées. Le mouvement des eaux de surface est lié en partie au vent, ce qui fait que cette forme d'énergie est aléatoire et son intégration au réseau devient plus délicate que celle des hydroliennes totalement immergées. De plus cette technologie est moins acceptée car elle gêne la navigation et la pêche et présente des risques en cas de coupure des amarres.

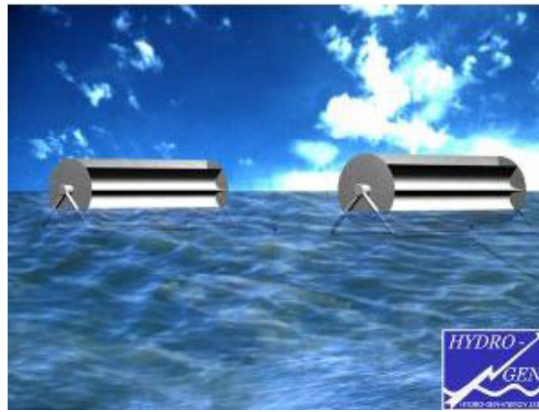


Figure I.8 : Hydrolienne utilisant une roue à aube flottante

## I.6.2 Deuxième classification

### I.6.2.1 Mode libre

La turbine est placée dans l'environnement marin, et récupère son énergie cinétique sans l'intervention d'aucun autre dispositif. C'est le cas des technologies citées dans la première classification (Figures 5 6 7 8).

### I.6.2.2 Mode canalisé (effet Venturi)

Ces hydroliennes exploitent l'énergie marine suivant « l'effet venturi », c'est-à-dire l'accélération d'un fluide dans une conduite dont le diamètre se rétrécit. Ainsi une petite turbine peut être utilisée pour produire une quantité plus grande d'énergie. Les prototypes déjà installés utilisent une turbine hydrolienne à axe horizontal. Ce concept a déjà été utilisé pour la propulsion des navires. Certains prototypes sont capables de fonctionner bi directionnellement et disposent d'un système permettant de faire sortir la turbine de la conduite, minimisant ainsi les difficultés d'entretien.

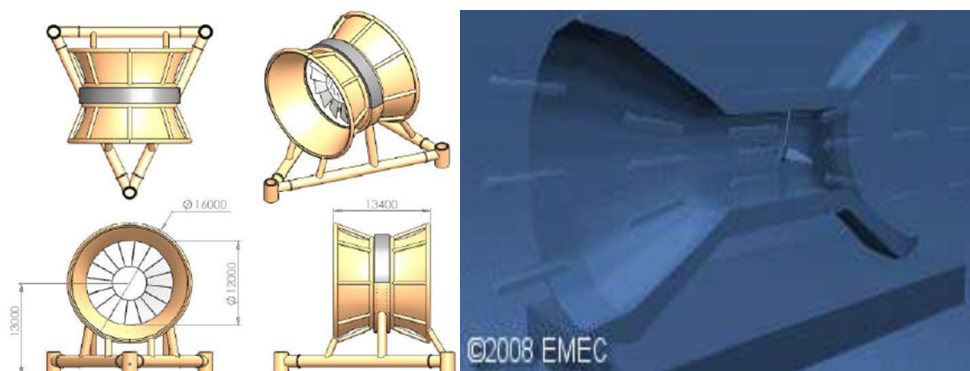


Figure I.9 : Hydroliennes à effet Venturi

## I.7 Comparaison entre la production éolienne et des hydroliennes

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 comme il l'a été démontré dans la première partie. Pour évaluer la puissance disponible, une comparaison avec les éoliennes s'impose [7].

### I.7.1 La 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.7.2 La 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.7.3 La 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 comme le montre la figure (I.10). La puissance récupérée par l'hydrolienne et l'éolienne est, comme nous venons de le voir, grossièrement de la forme

$$P_t = 0.5 \rho C_p S_t V^3$$

(Où  $\rho$  désigne la masse volumique du fluide considéré,  $S$  la surface balayée par le rotor, et  $V$  la vitesse du fluide incident). On peut remarquer que c'est sur toute la différence de masse volumique entre l'eau et l'air qui explique les différences de dimension entre les

deux objets. Pour une puissance comparable, les pales d'une hydrolienne sont plus petites que celles d'une éolienne.

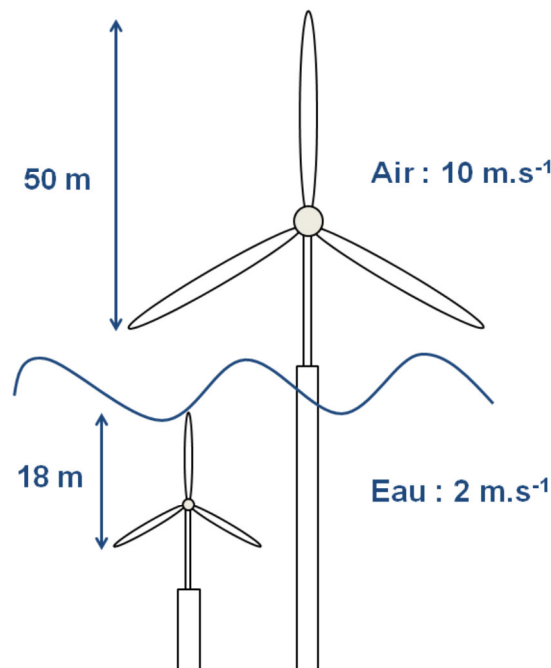


Figure I.10 : Comparaison entre une hydrolienne et une éolienne de même puissance 1MW

### I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie hydrolienne

L'hydrolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement. [8]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Les hydroliennes sont beaucoup plus petites que les éoliennes pour une même puissance: (la photo de figure I.10) montre une éolienne et une hydrolienne de même puissance, à la même échelle) cela étant dû à la masse volumique de l'eau 800 fois supérieure à celle de l'air.</li> <li>▶ Les courants marins sont relativement constants et leurs variations sont facilement prévisibles : on peut donc</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Les hydroliennes créent des zones de turbulences, ainsi elles empêchent la sédimentation de s'effectuer correctement et les végétaux ne peuvent pas se développer.</li> <li>▶ Du fait qu'elles soient sous l'eau, l'érosion des pâles d'hélice par le sable est très forte. Ainsi l'entretien doit être très fréquent, mais il est plus difficile qu'à l'air libre puisqu'on ne peut pas l'ouvrir sans</li> </ul>

<p>estimer avec précision la production d'électricité.</p> <p>► Les potentiels des courants marins sont très importants, EDF estime que 3 GW (soit environ 3 réacteurs nucléaires) peuvent être installés proches des côtes françaises.</p> <p>► L'hydrolienne utilise une énergie renouvelable (le courant marin) : elle ne pollue donc pas. De plus, elle ne présente aucun gêne pour les animaux marins puisqu'en général les hélices tournent entre 10-15 tours par minutes, soit 10 fois moins vite que les hélices d'un bateau.</p> <p>► Comme les hydroliennes se situent en pleine mer, elles ne gênent aucun habitant et ne gâchent pas le paysage.</p>	<p>que l'eau ne pénètre à l'intérieur et n'endommage tous les systèmes (mécanique et électrique). Pour cette raison certaines hydroliennes ont le pied qui dépasse de l'eau mais cela devient alors gênant pour la navigation des bateaux et cela gâche le paysage.</p> <p>► Elles coûtent très chers à l'entretien et à l'installation. Le coût d'installation d'une hydrolienne est de 3,8 millions d'euros pour chaque mégawatt installé, soit près d'un million de plus que pour l'éolien.</p> <p>► L'hydrolienne perturbe la sédimentation.</p>
--	--

**Table I.1** : Avantages et inconvénients de l'énergie hydrolienne

### I.9 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 300 kW, avec 1 m/s 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 1.000 heures par an et 2 m/s 2.000 heures par an et la puissance unitaire sera voisine de 0,5 à 1 MW. [9]

### **I.10 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 (I.11).

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 (I.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 [10].



**Figure I.11** : Maintenance d'une hydrolienne à l'aide d'un bateau



Figure I.12 : Plongeurs pour la maintenance (gauche) et utilisation de robots (droite)

## I.11 Modélisation de la Ressource

### I.11.1 Puissance maximale extraite

#### I.11.1.1 La 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 (I.13), une puissance extraite qui s'exprime :

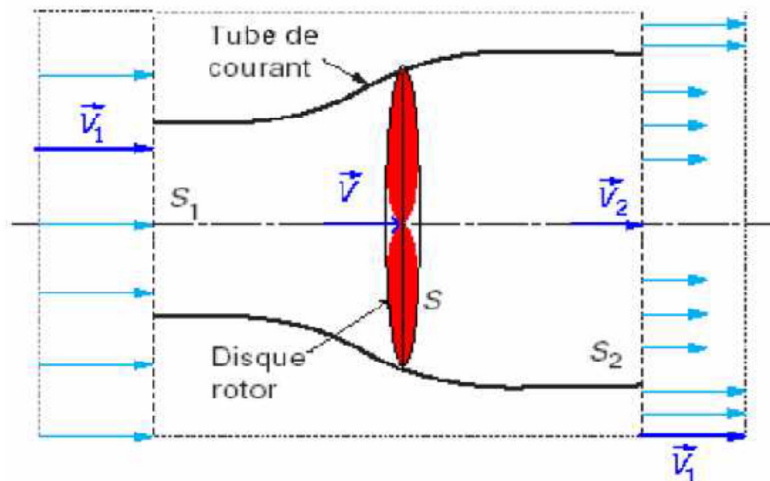


Figure I.13 : Veine de courant marin à la traversée de l'aéromoteur

- 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 :

$$S_1 \cdot V_1 = S \cdot V = S_2 \cdot V_2 \quad (I.1)$$

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 :

$$F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

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

$$P = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

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

$$dm = \rho \cdot S \cdot V \cdot dt \quad (I.4)$$

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 :

$$dW_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.5)$$

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

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S_1 \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

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

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (I.7)$$

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

$$P_t = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.8)$$

### **I.11.1.2 La limite de Betz**

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

$$\frac{dP_t}{dV_2} = 0 \quad \text{soit} \quad V_1 = 3V_2$$

Dans ces conditions la puissance maximale s'écrit :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho \cdot S \cdot V_1^3 = \left(\frac{16}{27}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3\right) \quad (I.9)$$

$$P_{\max} = \left(\frac{16}{27}\right) \cdot P_v \quad (\text{I.10})$$

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

Cette **limite de Betz**, représent maximum théorique, en pratique, les turbines conçues ces dernières années ont une valeur de  $C_p$  comprise entre 0.4 et 0.5.

### I.11.1.3 Potentiel de la ressource

La puissance cinétique totale disponible sur la turbine d'une l'hydrolienne est donnée par la relation (I.11)

$$P_T = 0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_{\text{marée}}^3 \quad (\text{I.11})$$

Cependant, seule une partie de l'énergie disponible peut être captée par l'hydrolienne(I.12) d'après la théorie de Betz,

$$P_{\text{hyd}} = 0.5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V_{\text{marée}}^3 \quad (\text{I.12})$$

Il est à noter que les expressions(I.11) et(I.12) 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.

$V_{\text{marée}}$  : La vitesse du fluide (m/s).

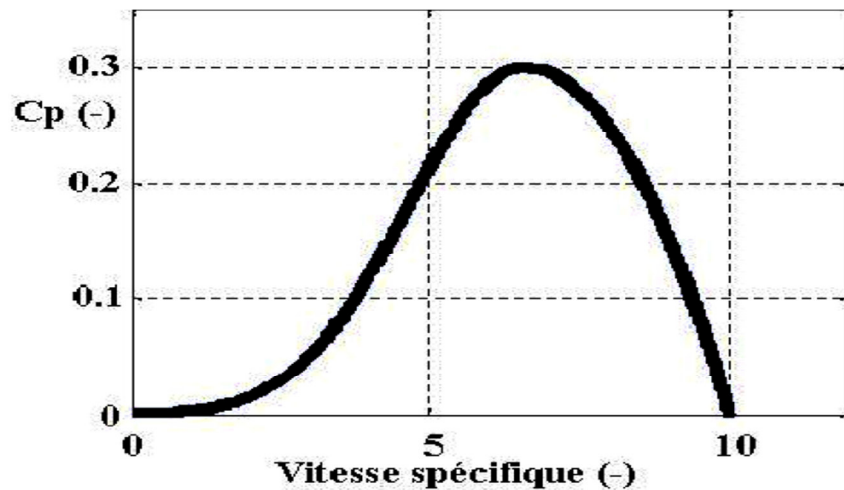
Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement hydrodynamique de la turbine. On définit le coefficient de vitesse relative comme un rapport entre la vitesse périphérique au bout de l'hélice et la vitesse instantanée de courant de marin des pales :

$$\lambda = (\Omega_{\text{turbine}} \cdot R) / V_c \quad (\text{I.13})$$

Avec  $\Omega_{\text{turbine}}$  : vitesse angulaire de rotation des pales [rd/s] et  $R$  : Rayon de la pale [m].

Où  $\lambda$  (-) est la vitesse spécifique,  $R$  (m) le rayon de la turbine,  $V_c$  (m/s) la vitesse

Equivalente de l'écoulement et  $\Omega_{\text{turbine}}$  (rad/s) la vitesse de rotation de la turbine



**Figure I.14 :** Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un courant de 2m/s [11]

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

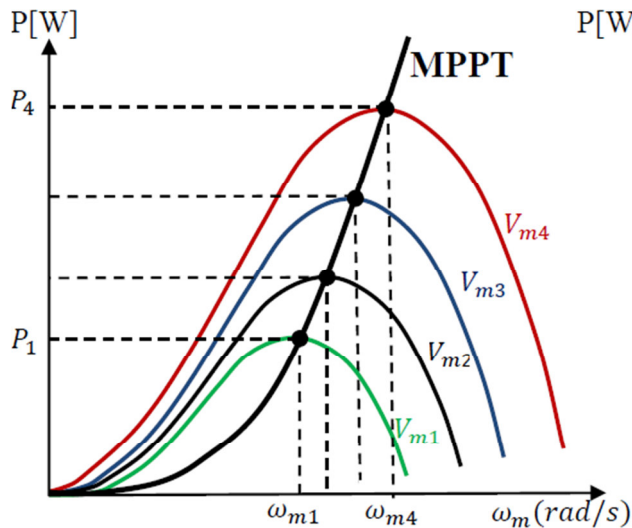
$$P_T = 0.5 \cdot \rho \cdot C_P \cdot S_T \cdot V^3 \quad (\text{I.14})$$

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.15).

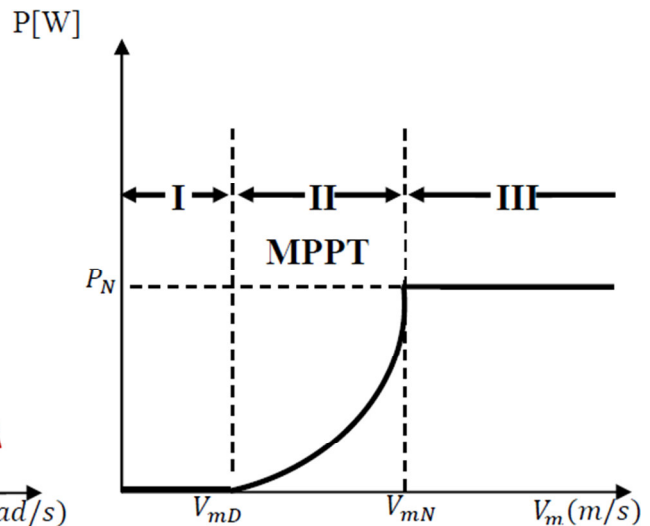
$$C_T = P_T / \Omega_{\text{(turbine)}} \quad (\text{I.15})$$

### I.12 Stratégie de maximisation et de limitation de la puissance

L'un des défis majeurs dans la réalisation d'un système d'extraction d'énergie cinétique est la maximisation de la puissance mécanique produite. La méthode la plus judicieuse, utilisée dans le système hydrolien et que nous utilisons dans ce chapitre point de puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking en anglais). La stratégie MPPT consiste à estimer le couple électromagnétique de manière à fixer une référence de la vitesse mécanique ( $w_m$ ) afin d'extraire la puissance maximale. Cette stratégie permet de rechercher les maxima sur la courbe de puissance Figure (I.15) où la vitesse mécanique de la génératrice est ajustée à sa valeur optimale pour chaque vitesse de la marée [6].



**Figure I.15** Courbe de puissance en fonction de vitesse mécanique (stratégie MPPT)



**Figure I.16** Limitation de la puissance en la fonction de la vitesse de marée

Les variations de la vitesse de marée sont totalement différentes de celles du vent qui est de nature stochastique et intermittente. Même si le souci majeur est de produire le maximum de puissance possible, il serait intéressant d'écarter la puissance au-delà d'une certaine vitesse de marée dite nominale (Fig. I.16). Cet écrêtage est intéressant dans le dimensionnement du générateur électrique, car il serait financièrement inutile de le dimensionner pour une vitesse de courant plus forte qui n'est observée que rarement. En plus, il permet de protéger l'hydrolienne contre les courants de vitesse très élevée, chose qui n'est pas fréquente car les sites potentiellement exploitables ont une vitesse maximale inférieure à 6m/s. Pour un site dont la vitesse maximale du courant est de 3 m/s, les valeurs des vitesses nominale  $V_{mN}$  et de démarrage  $V_{mD}$  sont estimées respectivement à 2.4 m/s et 0.5 m/s. La caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse de marée comporte trois zones distinctes (Fig. I.16).

- **Zone I** : où la turbine ne fournit aucune puissance car la vitesse de la marée est inférieure à celle de démarrage  $V_{md}$ .
- **Zone II** : où la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse de marée qui est supérieure à  $V_{md}$ . C'est aussi la zone de la stratégie MPPT.
- **Zone III** : où la puissance fournie est maintenue presque constante (sensiblement égale à la puissance nominale  $P_N$ ) dans la mesure où la vitesse de marée est supérieure à la vitesse nominale  $V_N$ . Généralement cela est réalisé par un dispositif de régulation permettant de protéger l'hydrolienne en maintenant sa vitesse de rotation constante.

**I.13 Mode de fonctionnement**

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

**I.13.1 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 paire de pôles de la génératrice. Ce système présente des avantages et des inconvénients.

**I.13.1.1 Avantages**

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

**I.13.1.2 Inconvénients**

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

**I.13.2 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 nécessaire d'utiliser des génératrices à fréquence fixe et vitesse variable fonctionnant sur une large gamme de vitesse marin pour récupérer la puissance [12].

**I.13.2.1 Avantages**

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

**I.13.2.2 Inconvénient**

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

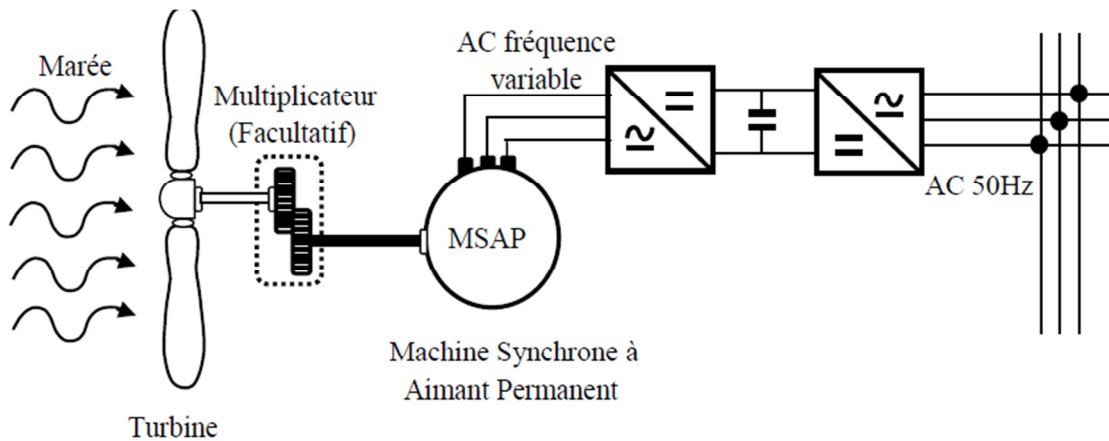
**I.14 Convertisseurs électromécaniques**

Deux types de convertisseurs électromécaniques sont généralement utilisés dans l'industrie hydrolienne pour la génération d'énergie électrique. Ces convertisseurs sont des génératrices asynchrones à double alimentation ou des génératrices synchrones à aimant permanent. Il est à noter que ces convertisseurs sont ceux qui sont le plus utilisés dans la production d'énergie hydrolienne. Pour une application donnée, le type de génératrice est choisi suivant des facteurs technico-économiques (présence ou non du multiplicateur, fonctionnement à vitesse variable, génération des grandes puissances, mode de couplage au réseau...). L'utilisation de ces deux types de génératrices offre aux hydroliennes la possibilité de connexion directe ou indirecte au réseau électrique. Les différentes configurations sont illustrées sur les figures ci-dessous:

**I.14.1 Machine synchrone à aimant permanent**

La Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) est très utilisée dans les applications hydroliennes, notamment, à cause de son bon rendement de conversion (proche de 99%) par rapport à la machine asynchrone. Elle permet aussi un fonctionnement à vitesse variable à condition qu'une interface d'électronique de puissance soit placée entre son stator et le réseau. Si cette machine a un grand nombre de paire de pôles, elle peut être directement entraînée par la turbine, éliminant ainsi le multiplicateur qui est une source de pertes de puissance. L'excitation de cette machine étant assurée par des aimants permanents et comme elle est entraînée par une turbine, on ne dispose d'aucune entrée pour réguler sa tension et sa fréquence nécessaire pour son couplage au réseau électrique. C'est pourquoi la connexion au réseau électrique des systèmes de production d'énergie cinétique utilisant cette machine exige une interface d'électronique de puissance. La figure (17) illustre la chaîne de conversion du système hydrolienne MSAP connecté au réseau électrique. [13]





**Figure I.17** : Structure de la chaîne de conversion utilisant une MSAP couplée au réseau

Dans les applications marines et plus particulièrement pour les hydroliennes, il est vrai que les machines synchrones à aimant permanent (MSAP) sont plus avantageuses que les asynchrones. Par ailleurs, le couplage au réseau de la MSAP exige l'utilisation de convertisseurs commandés (redresseur, onduleur). Ces convertisseurs entraînent des pertes de puissance et introduisent souvent des harmoniques indésirables pouvant affecter la qualité de connexion au réseau. De plus, ces convertisseurs sont placés entre le stator de la machine et le réseau électrique, par conséquent ils doivent être dimensionnés pour l'écoulement de toute la puissance produite. Ce fait alourdit leur complexité de mise en œuvre et engendre un surcoût financier par rapport aux convertisseurs utilisés entre le rotor de la machine et le réseau électrique qui ne seront dimensionnés que pour une faible puissance par rapport à la puissance totale produite. Pour ces raisons technico-économiques, nous utiliserons une génératrice synchrone à rotor bobiné qui peut être directement couplée au réseau si elle est commandée en tension et fréquence

#### I.14.2 Machine asynchrone à double alimentation

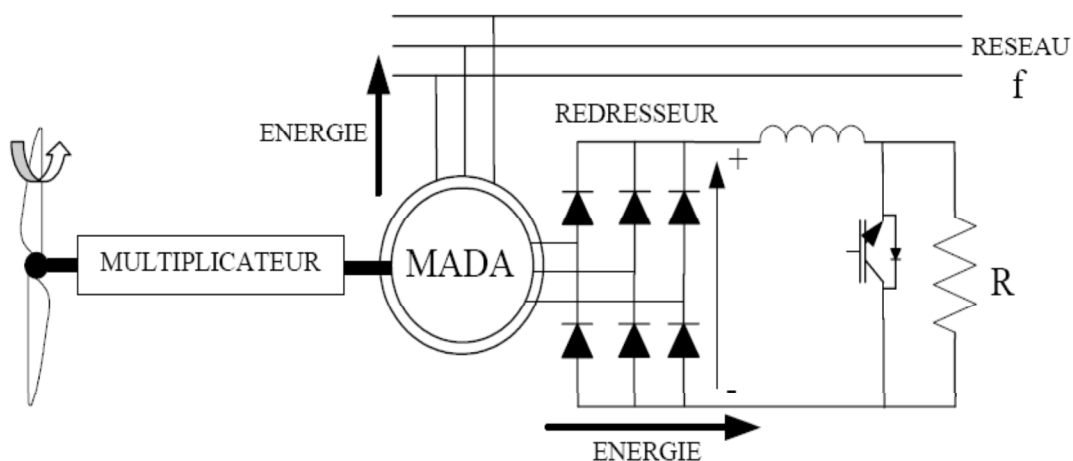
Cette machine présente un atout considérable, son principal avantage par rapport à la machine synchrone réside dans le fait que le contrôle de puissance se fait au niveau du rotor ce qui réduit le coût des convertisseurs statiques [14].

La machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différentes configurations décrites ci-dessous.

### I.14.2.1 Structure avec redresseur à diode et contrôleur de glissement

Le stator est connecté directement au réseau, et la variation du glissement se fait par extraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans une résistance placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT Figure I.18 Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

L'inconvénient de cette structure est que si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système [14].



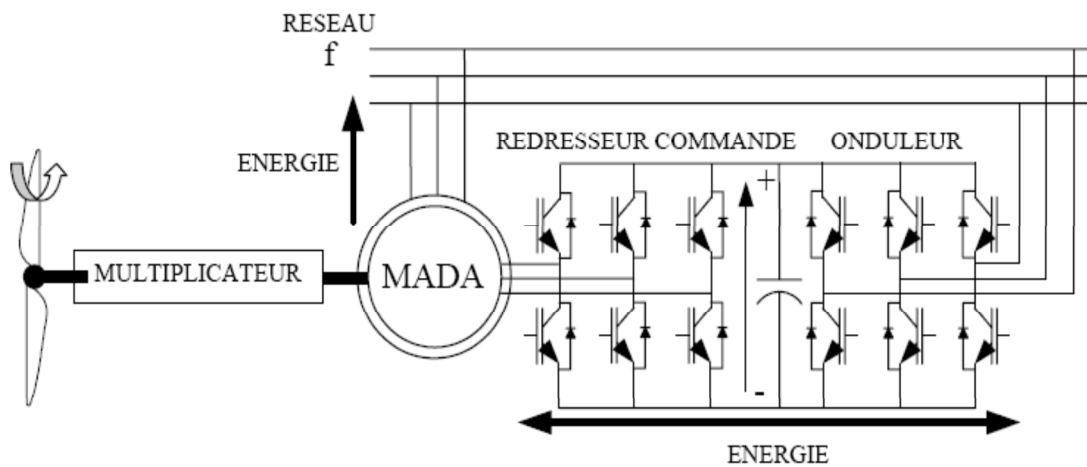
**Figure 1.18 :** Système hydrolienne utilisant la MADA avec control de glissement par dissipation d'énergie rotorique

### I.14.2.2 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

La structure de la Figure I.15 utilise deux ponts triphasés à base d'IGBT commandable MLI. Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du coté réseau [14].

Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la fiabilité de ce dispositif dans un système hydrolien à vitesse variable. La bidirectionnalité

du convertisseur statique installé au niveau de rotor autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.



**Figure I.19 :** Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Si le glissement reste inférieur à 30 % autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau

### I.15 Creux de tension

Un creux de tension est une chute de tension caractérisée par une profondeur variant de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée pouvant aller de 10ms à quelques secondes.

La profondeur d'un creux de tension est définie comme étant la différence entre la tension efficace pendant le creux de tension et la tension déclarée c.à.d. la tension nominale. Les creux de tensions proviennent généralement à partir de forts appels de courant. Les causes déclenchant ce type de défauts sont multiples :

- ✓ court-circuit entraînant des chutes de tension importantes
- ✓ des surcharges
- ✓ démarrages de moteur surtout de grande puissance

Les creux de tension dus à des courts-circuits sont à l'origine de nombreuses défaillances, ces dernières peuvent être symétriques ou asymétriques. Les creux de tension sont généralement caractérisés par leur amplitude et leur phase. L'amplitude du creux de tension est liée à la distance par rapport au point de défaut. La durée du creux de tension est liée au temps d'élimination du court-circuit par les protections du réseau ou des installations raccordées. Dans les systèmes triphasés, les creux de tension sont caractérisés par le déphasage entre les tensions en plus de leur amplitude et de leur phase. L'analyse des creux de tension d'un système triphasé est réalisée dans un plan complexe. Cette technique nous permet d'imaginer le type de creux de tension et sa gravité. Le tableau suivant illustre certains types de creux de tension.[15]

Type	Phaseurs	Tensions	Description
A		$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}jV$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}jV$	Creux de tension identiques sur les trois phases
B		$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}E - \frac{\sqrt{3}}{2}jE$ $V_c = -\frac{1}{2}E + \frac{\sqrt{3}}{2}jE$	Creux de tension Sur une phase
C		$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}E - \frac{\sqrt{3}}{2}jE$ $V_c = -\frac{1}{2}E + \frac{\sqrt{3}}{2}jE$	Creux de tension Sur deux phases

Tableau I.1 : Différents types de creux de tension

### I.15.1 Caractérisation des creux de tension

La Figure (I.20) représente le profil typique d'un creux de tension. Dans ce mémoire, le creux de tension sera caractérisé pour deux paramètres pour mesurer sa gravité : l'amplitude (remaining voltage) et sa durée. L'amplitude est la valeur minimale de la tension efficace sur un cycle et sa durée correspond au temps où la tension est sous un seuil défini. L'amplitude du creux de tension en un point du réseau dépend principalement du type de défaillance, de la distance à la défaillance, de la configuration du réseau et de l'impédance de défaillance. Nous supposons que la valeur efficace peut être décrite par une valeur de tension simple, ce qui est suffisant pour un système monophasé. Cependant, dans le cas d'un système triphasé, une part importante des dommages sur les équipements dus à un creux de tension concerne des charges triphasées.

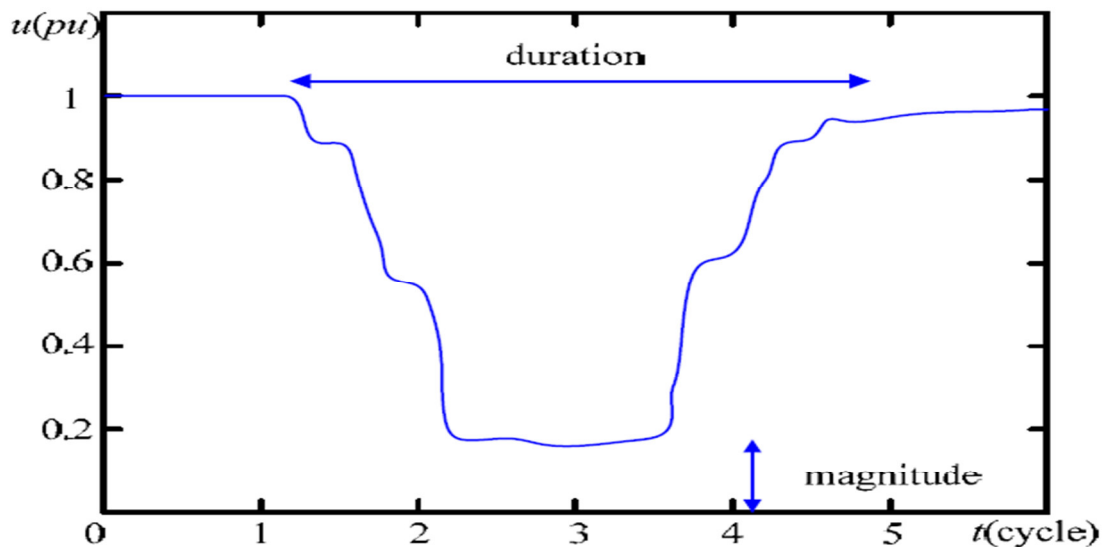


Figure I.20 : Caractérisation d'un creux de tension

### I.16 Conclusion

Un système de production d'énergie hydrolienne basé sur un profil réel de vitesse des marées Dans cette recherche, nous avons présenté les différents choix adoptés et les raisons qui les justifient. Au début, une présentation est faite sur les énergies marines en général et une attention particulière a été portée sur les courants de marées qui entraînent les hydroliennes. Ces hydroliennes ont été présentées et classées de deux manières : suivant la technologie et le mode d'extraction. Compte tenu des contraintes hydrodynamiques et hydrographiques du site du Raz de Sein, l'hydrolienne tripale immergée à axe horizontale a été retenue à cause de son meilleur rendement de conversion par rapport aux autres

technologies. Cette hydrolienne fonctionnera à vitesse variable, ce qui est avantageux dans la maximisation de la puissance produite et dans le mode de couplage du générateur électrique au réseau.

Dans l'élaboration de la stratégie de maximisation, Pour un meilleur rendement dans la production d'énergie électrique, il apparaît avantageux d'utiliser une génératrice synchrone qu'une asynchrone. Le mode de couplage au réseau électrique de ces génératrices synchrones peut se faire directement ou à travers un dispositif d'électronique de puissance.

Les turbines hydrolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) afin de satisfaire la contrainte de rester connectées lors d'un défaut en tension (creux de tension) aux bornes du générateur.

# *Chapitre II*

*Modélisation Et*

*Commande D'un*

*Système Hydrolienne*

### II.1 Introduction

Une turbine hydrolienne permet la conversion d'énergie cinétique des courants marins en énergie mécanique transmise à la génératrice, pour cela les différents éléments constituant une hydrolienne sont conçus pour maximiser cette conversion. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre la caractéristique couple/vitesse de la turbine et celle de la génératrice. Pour satisfaire cette condition, l'hydrolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement

### II.2 Présentation de système à étudier

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  $\Omega_t$ . Cet arbre entraîne une génératrice asynchrone 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 :

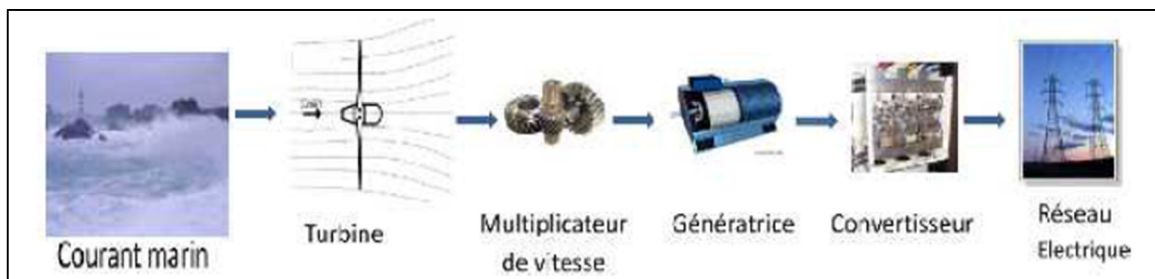


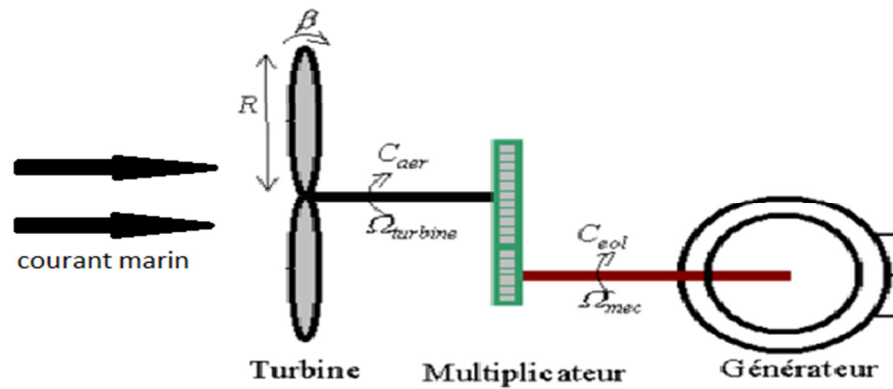
Figure II.1 : Schéma globale d'une chaîne de conversion hydrolienne

### 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 [16].





**Figure II.2 :** Schéma de la turbine hydrolienne

La puissance extraite par la turbine hydrolienne  $P_t$  est calculée par (II.1).

$$P_T = 0.5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot S_T \cdot V^3 \quad (\text{II.1})$$

$C_p$  : est le coefficient de puissance dont la limite théorique est de 0.59.

$\lambda$  : est la vitesse spécifique,

$S_T$  : est la surface balayée par les pales.

$\rho$  : est la masse volumique de l'eau.

$V$  : est la vitesse des marées.

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) :

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

Avec :

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

La vitesse spécifique  $\lambda$  est donnée par la relation

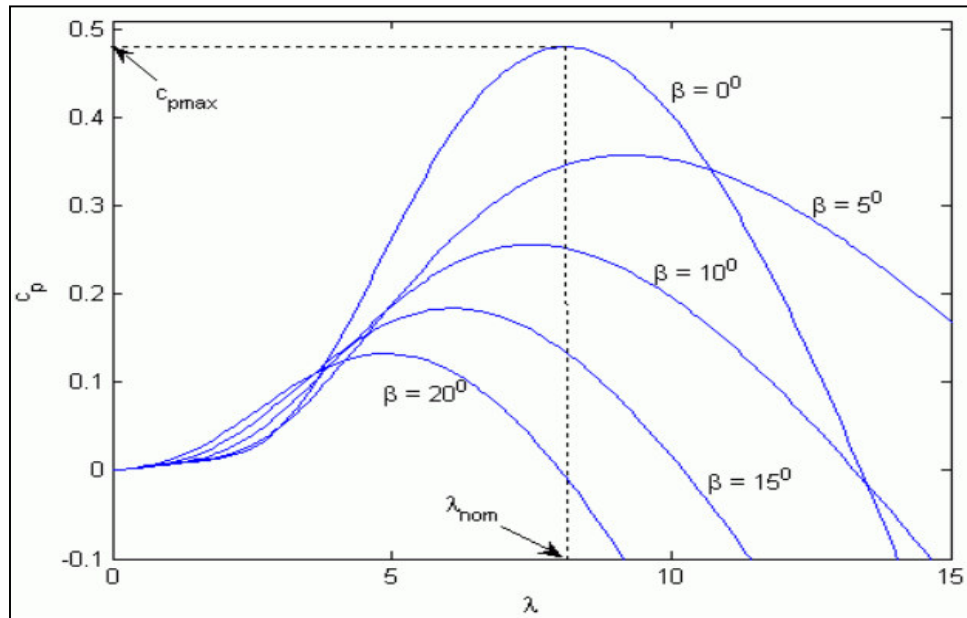
$$\lambda = \frac{(\Omega_t \cdot R)}{V} \quad (\text{II.3})$$

Le couple aérodynamique de l'hydrolienne est déterminé par la relation suivant:

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

$\Omega_t$ : Vitesse de la turbine.

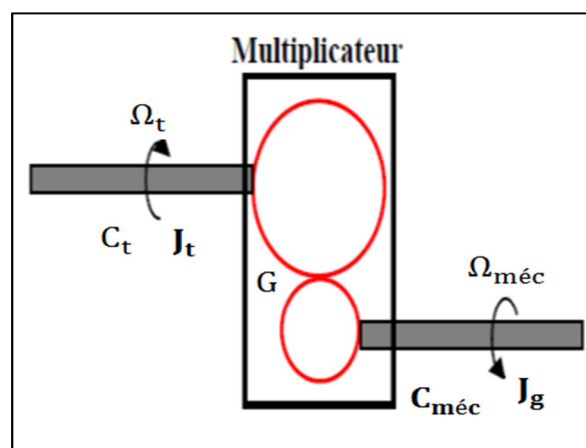
$R$ : Rayon de la turbine hydrolienne.



**Figure II.3 :** Caractéristique  $C_p(\lambda)$  pour divers valeur de  $\beta$

### II.3.2 Modélisation du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. Ce multiplicateur est considéré parfait, donc il se réduit à un simple gain  $G$ .



**Figure II.4 :** Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

Par le principe de conservation de la puissance mécanique échangée entre la turbine et la génératrice à travers le multiplicateur de vitesse on a :

$$C_g = \frac{C_{hyd}}{G} \quad (II.5)$$

$$\Omega_{mec} = \Omega_{turbine} \cdot G \quad (II.6)$$

Avec :

$C_g$ : Couple de la génératrice.

$C_{hyd}$  : Couple de l'hydro générateur.

$G$  : Le rapport du multiplicateur.

$\Omega_{turbine}$ : Vitesse de rotation de la turbine.

$\Omega_{mec}$ : Vitesse de rotation de la génératrice.

### II.3.3 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.3.4 Modélisation de l'arbre de transmission

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et générateur est donnée par :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_t}{dt} = C_{hydr} - C_{em} - (f_m - f_t) \Omega_t \quad (II.7)$$

$$J_t \gg J_m \Rightarrow (J_t + J_m) \approx J_t = J \quad (\text{II .8})$$

$$f_m \gg f_t \Rightarrow (f_t + f_m) \approx f_m = f \quad (\text{II .9})$$

Avec :

$J_t$  et  $J_m$  : sont les inerties de la turbine et de la machine respectivement

$f_m$  : Coefficient de frottement de la machine

$f_t$  : Coefficient de frottement de la turbine

$C_{hydr}$  : Couple statique fournie par l'hydrolienne

Dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice. Par suit, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaine hydrolienne est donné par l'équation différentielle suivante :

$$C_{hydr} = J_t \frac{d\Omega_t}{dt} + C_{em} + f_m \Omega_t \quad (\text{II .10})$$

Le couple mécanique  $C_{mec}$  prend en compte le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple frottement visqueux  $C_{vis}$  et le couple hydrogénérateur  $C_{hydr}$

$$C_{mec} = C_{hydr} + C_{em} + C_{vis} \quad (\text{II .11})$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par coefficient de frottement visqueux  $f_m$

$$C_{vis} = f_m \Omega_t \quad (\text{II .12})$$

### II.3.4 Schéma bloc du modèle de la turbine hydrolienne

Le schéma bloc du modèle de la turbine hydrolienne est représenté sur la Figure (II.5). les entrées sont la vitesse des courants marins, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple respectivement en vitesse de la turbine et en couple de la génératrice. Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique de la génératrice.

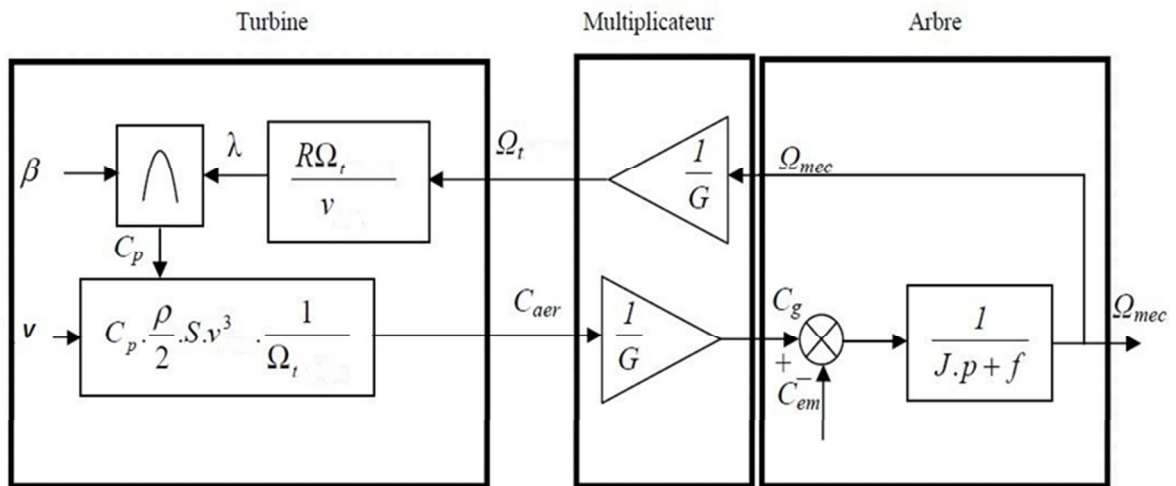


Figure II.5 : Modèle de l'aérogénérateur

#### 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 Maximisation de la puissance extraite

La courbe de puissance typique des hydroliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un prélèvement maximal de l'énergie des courants marins, on parle ainsi de maximisation de la puissance, voire de MPPT (Maximum Power Point Tracking). En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux structures de commande :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

Nous nous intéressons seulement au contrôle sans asservissement de la vitesse. Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse de l'eau varie très peu en régime permanent.[17]

##### 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. 13)

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \Gamma_{méc} \quad (II.13)$$

On néglige le couple des frottements visqueux  $\Gamma_{visq} = 0$  on obtient donc la relation (II.14)

$$\Gamma_{méc} = \Gamma g \quad (II.14)$$

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

$$C_{hydr} = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} \cdot C_{p-max} \cdot \rho \cdot S_T \cdot V_{est}^3 \quad (II.15)$$

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

$$\Gamma_{méc-rég} = \frac{C_{hydr}}{G} \quad (II.16)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_t$  est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique

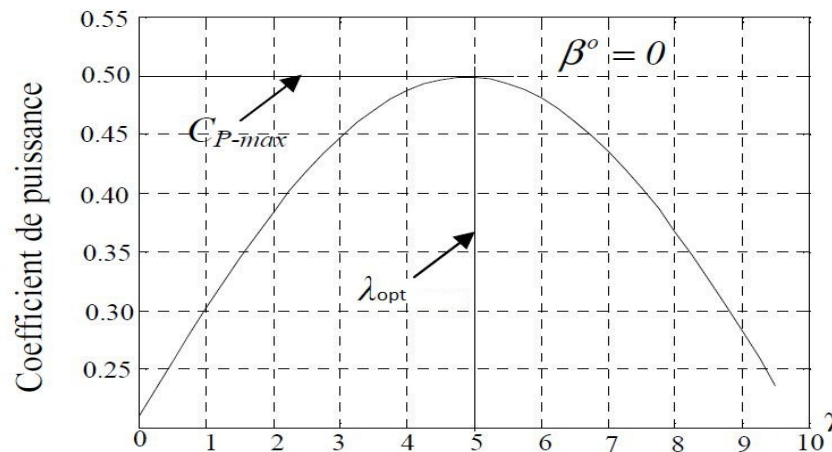
$$\Omega_{t-ref} = \Omega_{mec}/G \quad (II.17)$$

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

$$V_{est} = \frac{R \cdot \Omega_{t-ref}}{\lambda_{opt}} \quad (II.18)$$

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.6) [17]

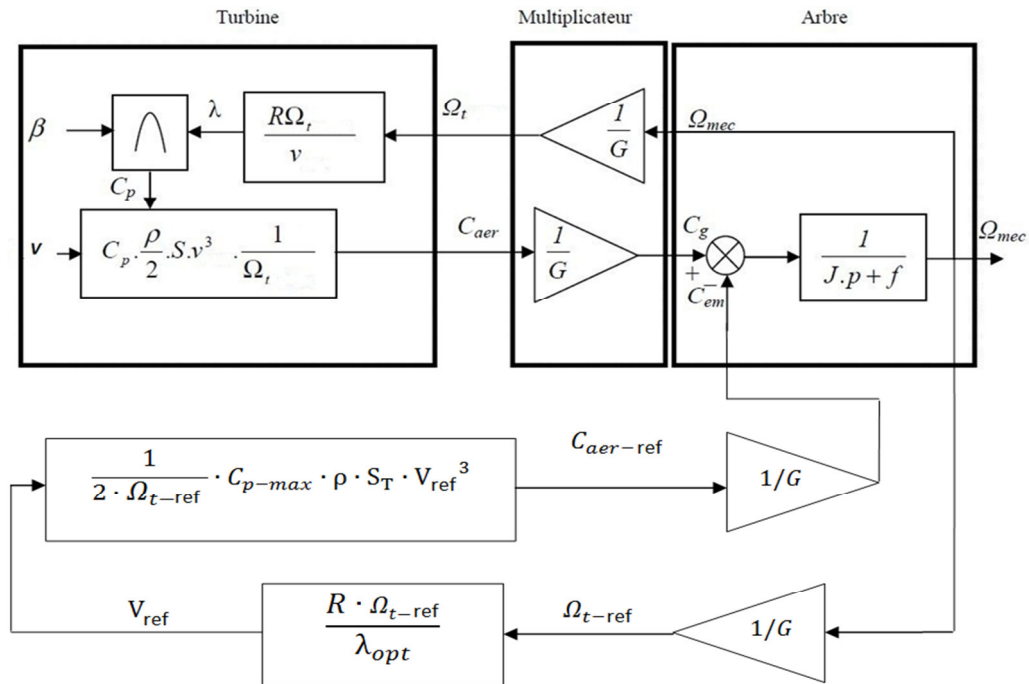


**Figure II.6 :** Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de rapport de vitesse  $\lambda$

En regroupant les équations (II.14) , (II.15), (II.16), et (II.18) on obtient une relation globale L'algorithme de MPPT est donné par la relation (II.19)

$$\Gamma_{mec} = \frac{C_{P\ max}}{\lambda^3_{opt}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot \frac{R^5}{G^3} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II.19)$$

La Figure II.7 représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.



**Figure II.7 :** Le schéma bloc du modèle de la turbine avec MPPT sans asservissement de la vitesse

### II.6 Modélisation de la partie électrique

#### II.6.1 Structure de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge, elle se compose d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor, de forme cylindrique et mobile. Le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle, qui sont alimentés directement par le réseau. Le rotor 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. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine (Figure II.8) [18]

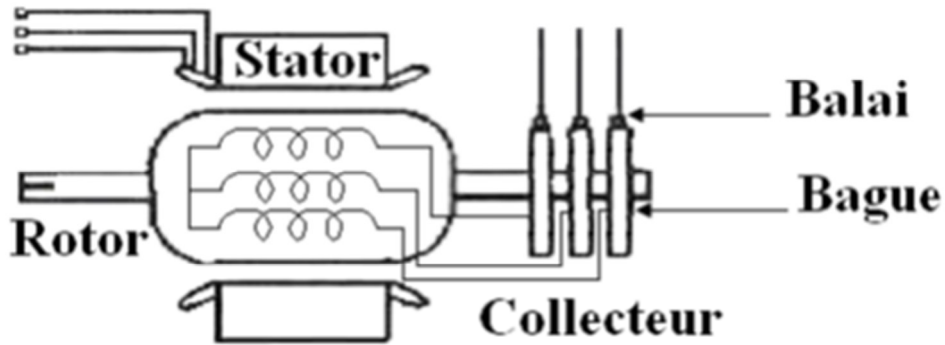


Figure II.8 : Structure de la MADA

### II.6.2 Fonctionnement de la MADA en génératrice

Lorsque la machine se comporte comme une génératrice, son stator fournit de la puissance active au réseau, et la puissance rotorique soit consommée ou fournie suivant la vitesse d'entraînement de la génératrice.

➤ **Fonctionnement hyposynchrone ( $g > 0$ )**

La vitesse de rotation de la génératrice est inférieure à la vitesse de synchronisme ( $g > 0$ ), le stator fournit une puissance active au réseau, et le rotor reçoit de la puissance active du réseau (Figure II.9).

➤ **Fonctionnement hypersynchrone ( $g < 0$ )**

La vitesse de rotation de la génératrice est supérieure à la vitesse de synchronisme ( $g < 0$ ). Le réseau reçoit deux puissances actives, celle fournie par le stator et celle fournie par le rotor. Donc la puissance totale produite par la MADA est la somme de deux puissances (statorique et rotorique) (Figure II.9).

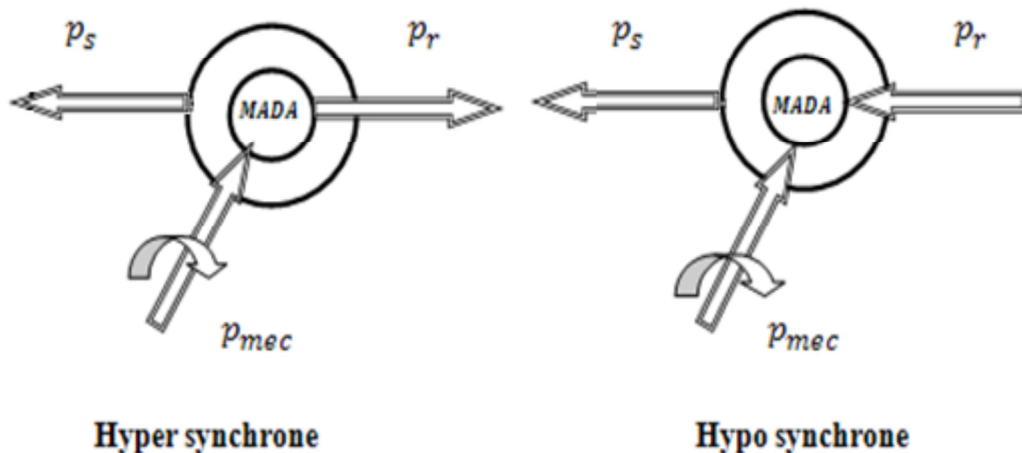


Figure II.9 : Fonctionnement en mode génératrice



### II.7 Modélisation de la MADA

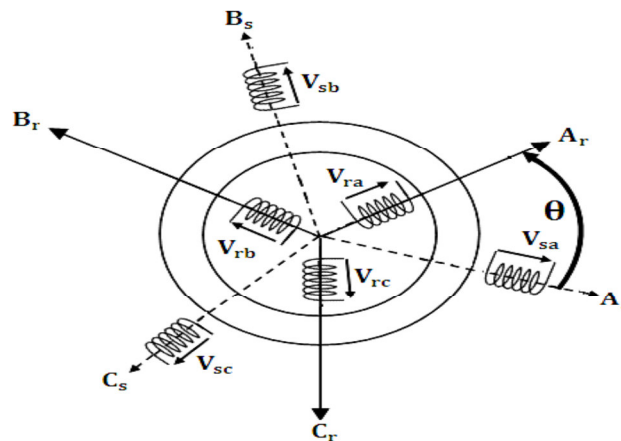
#### II.7.1 Hypothèses simplificatrices

Dans le cadre de la modélisation de la MADA, nous tenons compte de certaines 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.

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

On considère que la machine asynchrone à double alimentation est alimentée par deux systèmes de tensions sinusoïdales triphasés équilibrés ( $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ ) la pulsation ( $\omega_s = 2\pi f_s$ ) et ( $V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$ ) de pulsation ( $\omega_r = 2\pi f_r$ ).



**Figure II.10** : Représentation schématique de la MADA

##### II.7.2.1 Equations électriques

Pour les phases statoriques on a :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II} .20)$$

Sous forme matricielle :

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

Donc l'équation générale du stator est :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sabc}] \quad (\text{II .21})$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur des tensions statoriques}$$

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur des courants statoriques}$$

$$[\varphi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur du flux d'enroulement statorique}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances statorique}$$

Pour les phases rotoriques on a :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II .21})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Donc l'équation générale du roto

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{rabc}] \quad (\text{II .22})$$

Avec :

$$[V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur des tensions rotoriques}$$

$$[i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur des courants rotoriques}$$

$$[\varphi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur du flux d'enroulement rotorique}$$

$$\begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances rotoriques}$$

### II.7.2.2 Equations magnétiques

Les équations magnétiques de la MADA sont données par :

$$\begin{cases} [\varphi_{sabc}] = [L_{SS}][i_{sabc}] + [M_{SR}][i_{rabc}] \\ [\varphi_{rabc}] = [L_{RR}][i_{rabc}] + [M_{RS}][i_{sabc}] \end{cases} \quad (\text{II .23})$$

Avec :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} \quad [L_{RR}] = \begin{bmatrix} L_R & M_R & M_R \\ M_R & L_R & M_R \\ M_R & M_R & L_R \end{bmatrix}$$

$$[M_{SR}]^t = [M_{RS}] = M_{\max} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$[L_{SS}], [L_{RR}]$  : Matrices d'inductances statorique et rotorique

$[M_{SR}]$  : Matrice d'inductance mutuelle,  $[M_{SR}]^t = M_{SR}$

$L_S, L_R$  : Inductances propres d'une phase statorique et rotorique respectivement

$M_S, M_R$  : Inductances mutuelles entre deux phases statorique et rotorique respectivement

$M_{SR}$  : Maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique

D'après les expressions précédentes, on aura :

$$\begin{bmatrix} [\varphi_{sabc}] \\ [\varphi_{rabc}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{SS}] & [M_{SR}] \\ [M_{RS}] & [L_{RR}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{sabc}] \\ [i_{rabc}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Finalement

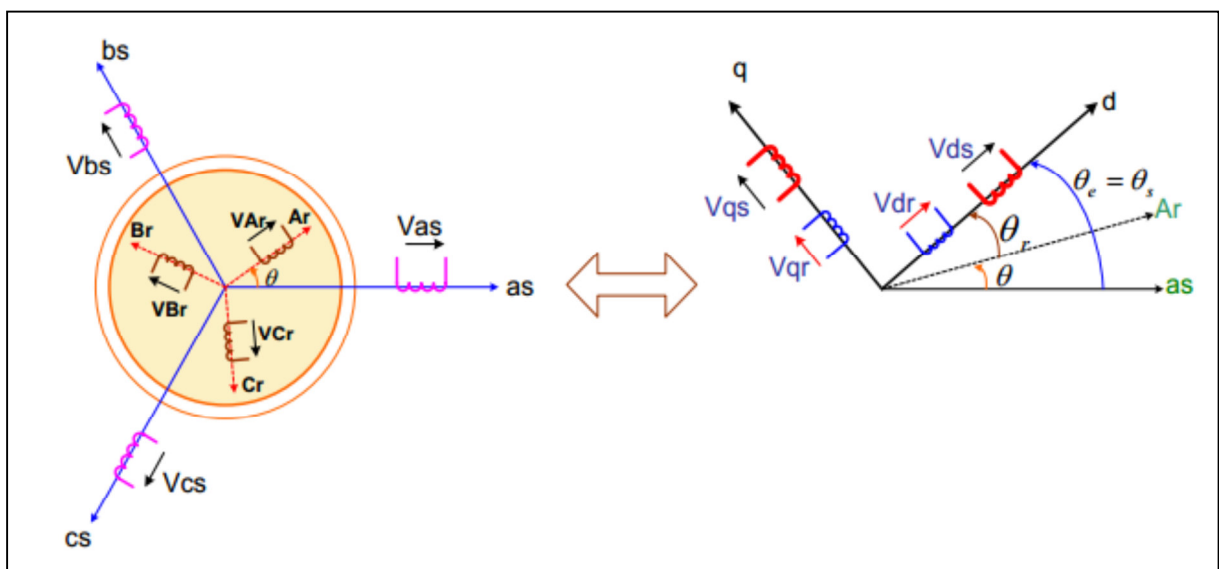
$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_S][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [L_{SS}][i_{sabc}] + [M_{SR}][i_{rabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_R][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [L_{RR}][i_{rabc}] + [M_{SR}]^t[i_{sabc}] \end{cases} \quad (\text{II .25})$$

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

Le but du changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park.

#### II.7.3.1 Transformation de Park

La transformation de Park définie par la matrice de rotation  $[A(\theta)]$  permet de ramener les variables du repère triphasé (a,b,c) sur les axes d'un repère biphasé tournant (d,q,o), les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q), Figure(II.11)



**Figure II.11** : Passage du triphasé au biphasé

En faisant coïncider les axes directs et quadratures du stator et du rotor, les calculs seront simplifiés. [19]

La matrice de Park est donnée sous forme

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = A(\theta) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Avec  $A(\theta)$ : la matrice de transformation de Park est donnée par :

$$[A(\theta)] = \sqrt{(2/3)} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Et la transformation inverse de Park est donnée par :

$$[A(\theta)]^{-1} = \sqrt{(2/3)} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$\theta$  : est l'angle de rotation électrique entre l'axe d du repère biphasé et le repère fixe lié à la phase du stator.

Le transfert biphasé vers triphasé se fait par :  $\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [A(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}$  (II.27)

Et le transfert triphasé vers biphasé se fait par :  $\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = [A(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$  (II.28)

**II.7.3.1.1 Equations électriques**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (II .29)$$

Notons que :

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

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

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

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

$\omega_m$  : Est la pulsation mécanique

**II.7.3.1.2 Equations magnétiques**

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = l_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = l_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = l_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = l_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II .30})$$

Avec :

$l_s = L_s - M_s$ : Inductance cyclique statorique de la machine.

$l_r = L_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique de la machine.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  : Inductance magnétique de la machine.

Avec respectivement :

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}$  et  $V_{qr}$  tensions statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé.

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}$ , et  $I_{qr}$  courants statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé.

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}$  flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système dq

**II.7.3.1.3 Equation mécanique**

L'équation du couple électromagnétique [19]

Pour le couple électromagnétique, son expression générale est donnée par :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \quad (\text{II. 31})$$

Le couple électromagnétique de la machine en fonction des flux et des courants statoriques est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = P(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II .32})$$

Ce couple en fonction des flux statoriques et des courants rotoriques est donné par :

$$C_{em} = P \frac{M}{l_s} (\varphi_{ds} i_{qr} - \varphi_{qs} i_{dr}) \quad (\text{II .33})$$

Avec P : est le nombre de pair de pôles de la machine

**II.9 Modèle de la MADA en vu de la commande**

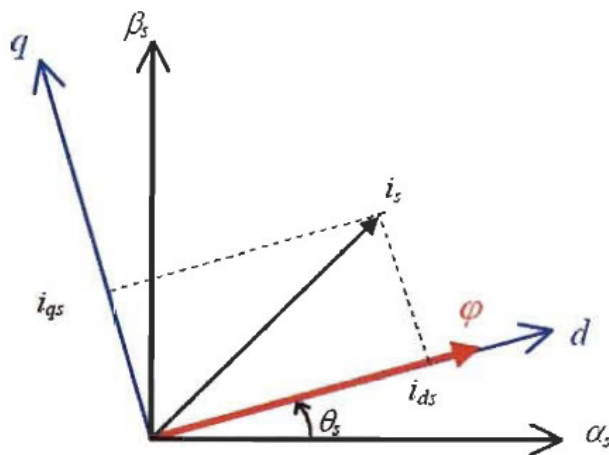
**II.9.1 Commande vectorielle**

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 [20].

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 :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \tag{II. 34}$$

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  $\varphi_{qs} = 0$ . Ainsi  $\varphi_{ds} = \varphi_s$  uniquement



**Figure II.12** : Principe du contrôle vectoriel.

Donc on trouve :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} I_{qr} \tag{II. 35}$$

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 [20].

Donc on a  $\varphi_{ds} = \varphi_s$  et  $R_s = 0$ , les équations deviennent:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Et on peut alors écrire que:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

### II.9.2 Relations entre puissance statorique et courants rotoriques

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Les puissances active  $P_s$  et réactive  $Q_s$  sont donc respectivement en fonction des courants statoriques  $I_{qs}$  et  $I_{ds}$ , sur les quels nous n'avons aucune action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques(II.40), nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

En remplaçant les courants statoriques (II.43) dans (II.42) on trouve pour les équations des puissances actives et réactive :



$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante  $M$  constante, on remarque que l'équation (II.44) fait apparaître que la puissance active  $P_s$  statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature  $i_{qr}$ . De plus, la puissance réactive  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $i_{dr}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ .

### II.8.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

En remplaçant dans l'équation des flux (II.45) les courants statoriques par l'expression (II.43) on obtient:

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système(II.37), on trouve :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{qr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r + \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Où  $g$  correspond au glissement de la machine asynchrone.

A partir des systèmes d'équations (II.44) et(II.46), nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de présent le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite. Nous présentons le schéma en figure II.13 qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactive statoriques.

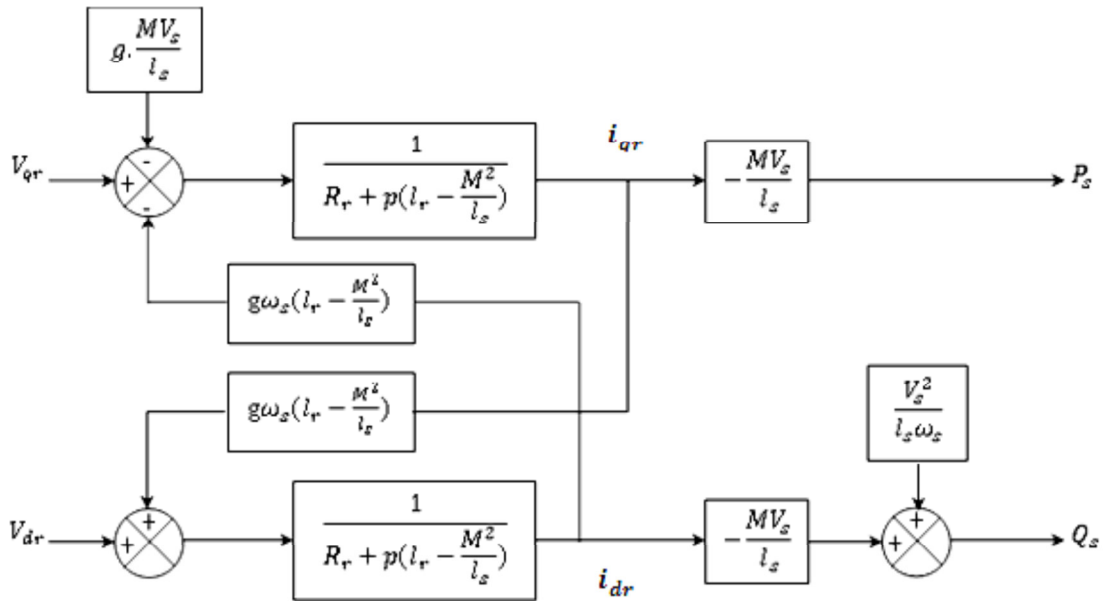


Figure II.13 : Schéma bloc de la MADA

L'expression  $g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$  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 la suite de ce chapitre.

### II.9 Modélisation des convertisseurs statiques

Les convertisseurs utilisés sont de type parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et de diodes antiparallèles commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour deux raisons principales :

- ✓ Permet un transfert bidirectionnel de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet les fonctionnements en hypo et hyper synchrone.
- ✓ Générer moins ou pas de perturbations sur le réseau électrique par propagation des courants harmoniques [19].

II.9.1 Modélisation du redresseur MLI

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

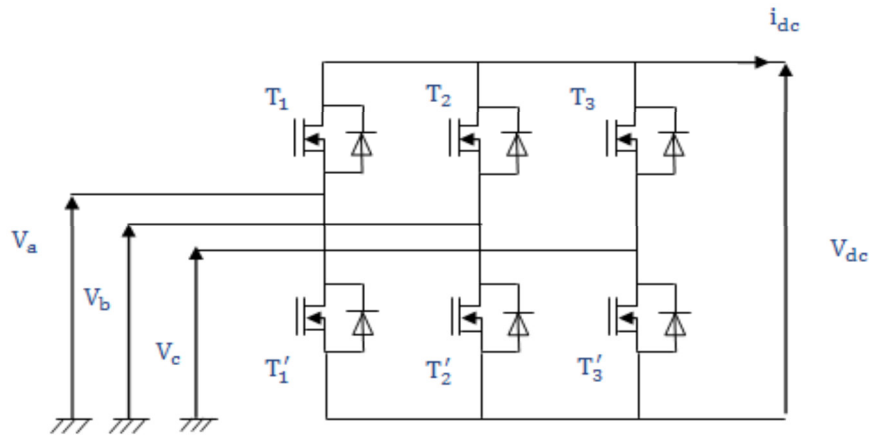


Figure II.14 : Redresseur MLI

Le redresseur MLI est modélisé par la matrice de connexion suivante

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix}$$

$$i_{dc} = S_a \cdot i_b + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \tag{II.47}$$

Avec :

$V_{dc}$  : Tension redressée.

$i_{dc}$  : Courant redressé.

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

II.9.2 Modélisation du filtre de bus continu

Pour corriger la source de tension continue, on insert à la sortie du redresseur une capacité C, celle-ci absorbe la différence entre le courant unidirectionnel et supprime les brusques variations de E lors des commutations, par contre, pour réduire l'ondulation du courant et protéger l'onduleur contre la vitesse critique de croissance du courant  $\frac{di}{dt}$ , on place en série une inductance de lissage L,

Le schéma représentatif du filtre est donné par la Figure (II.15)

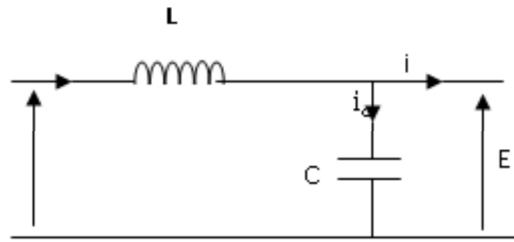


Figure II.15 Représentation du filtre

Les équations du filtre sont :

$$\begin{cases} \frac{di_{dc}}{dt} = \frac{1}{L} (V_{dc} - E) \\ \frac{dE}{dt} = \frac{1}{C} (i_{dc} - i) \end{cases} \quad (II .48)$$

### II.9.3 Modélisation de l'onduleur de tensions MLI

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure (II.16), on considère son alimentation comme une source parfaite (bus continu), supposée d'être constituée de deux générateurs de f.e.m égale à  $U_{dc}/2$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ .

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$ . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux).

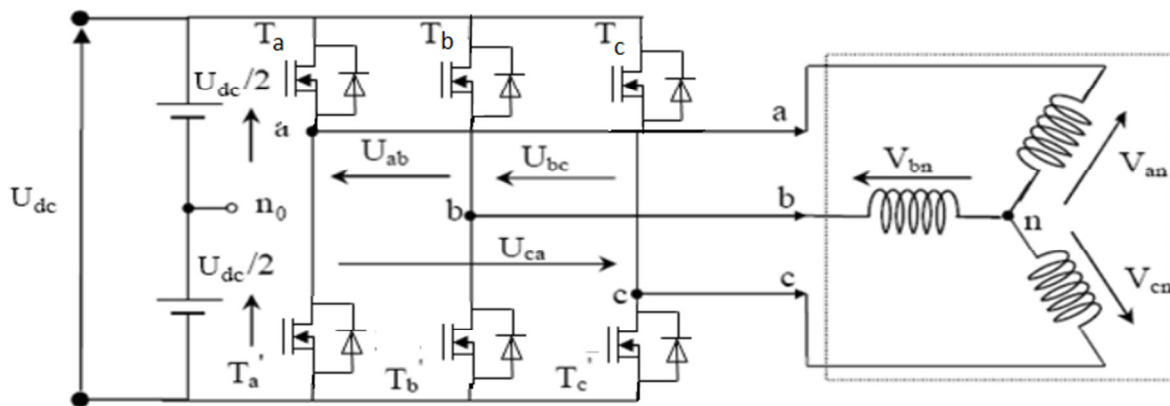


Figure II.16 : Représentation schématique de l'onduleur

On a :

- si  $S_i = 1$ , alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert.
- si  $S_i = 0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{ano} - V_{bno} \\ U_{bc} = V_{bno} - V_{cno} \\ U_{ca} = V_{cno} - V_{ano} \end{cases} \quad (2.49)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (II.50)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ .

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{ano} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bno} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cno} \end{cases} \quad (II.51)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{ano} + V_{bno} + V_{cno}] \quad (II.52)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $\Leftrightarrow S_i$  ( $i = a, b, c$ ), on a :

$$V_{ino} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0.5)U_{dc} \quad (II.53)$$

On trouve donc :

$$\begin{cases} V_{ano} = (S_a - 0.5)U_{dc} \\ V_{bno} = (S_b - 0.5)U_{dc} \\ V_{cno} = (S_c - 0.5)U_{dc} \end{cases} \quad (II.54)$$

En remplaçant l'équation (II.52) dans l'équation (II.51), on obtient

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{2}{3}V_{ano} - \frac{1}{3}V_{bno} - \frac{1}{3}V_{cno} \\ V_{bn} &= -\frac{1}{3}V_{ano} + \frac{2}{3}V_{bno} - \frac{1}{3}V_{cno} \\ V_{cn} &= -\frac{1}{3}V_{ano} - \frac{1}{3}V_{bno} + \frac{2}{3}V_{cno} \end{aligned} \quad (II.55)$$

En remplaçant l'équation (II.54) dans l'équation (II.55), on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.56)$$

Il suffit d'appliquer la transformation de Park pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

### II.9.4 Commande MLI des convertisseurs

L'objectif de la commande MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont le fondamental est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur.

Cette méthode permet d'obtenir, de façon simple, les temps de conduction de chaque interrupteur.

Plusieurs types de MLI sont utilisés. On peut citer par exemple, la MLI sinus avec porteuse triangulaire, la MLI pré calculée et la MLI vectorielle. Toute fois nous adoptons la MLI naturelle à cause de sa simplicité d'élaboration, dont son principe est représenté dans la figure suivante :

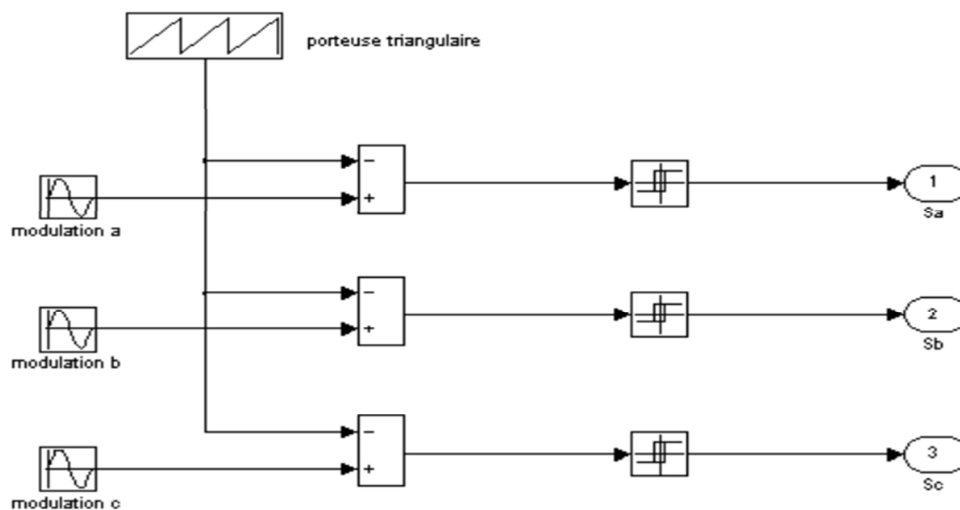


Figure II.17 : Schéma de principe de la MLI naturelle

### II.10 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 modélise cette machine sur un repère tournant diphasée (d, q) a l'aide de la transformation de Park. On a aussi modélisé les convertisseurs statiques utilisés dans cette conversion d'énergie.

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

# *Chapitre III*

## *Simulation Du Système Globale*



III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on propose une simulation de la chaine de conversion d'énergie du système hydrolien global. Les résultats de simulation numérique du comportement dynamique du système sont présentés pour justifier d'une part, les modèles mathématiques développés au chapitre précédent, et d'autre part, le bon fonctionnement du système.

III.2 Simulation du système hydrolien global

La figure ci-dessous représente le schéma synoptique du système hydrolien global

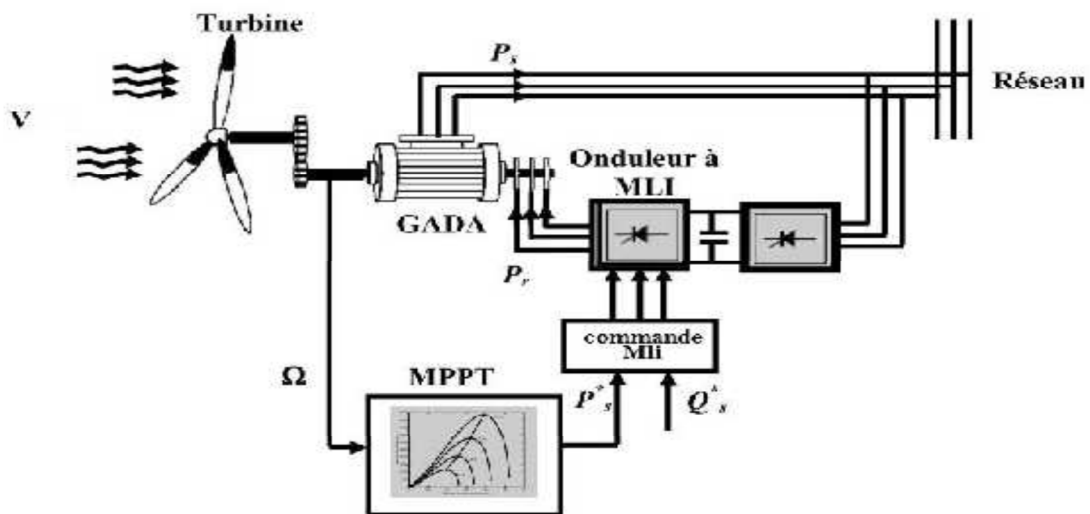


Figure III.1 : Schéma structurel de la commande de système hydrolienne globale.

III.3 Profil du courant marin (constant)

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

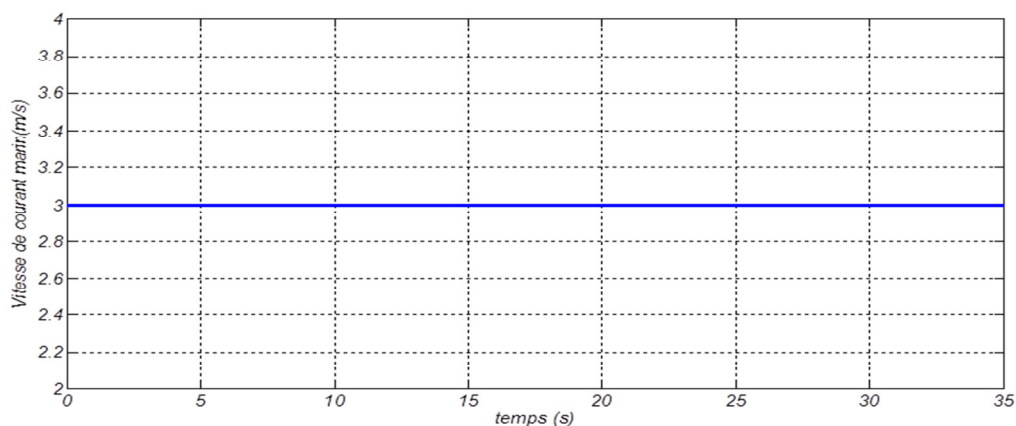


Figure III.2.1 : Allure du courant marin

III.3.1 Coefficient de puissance

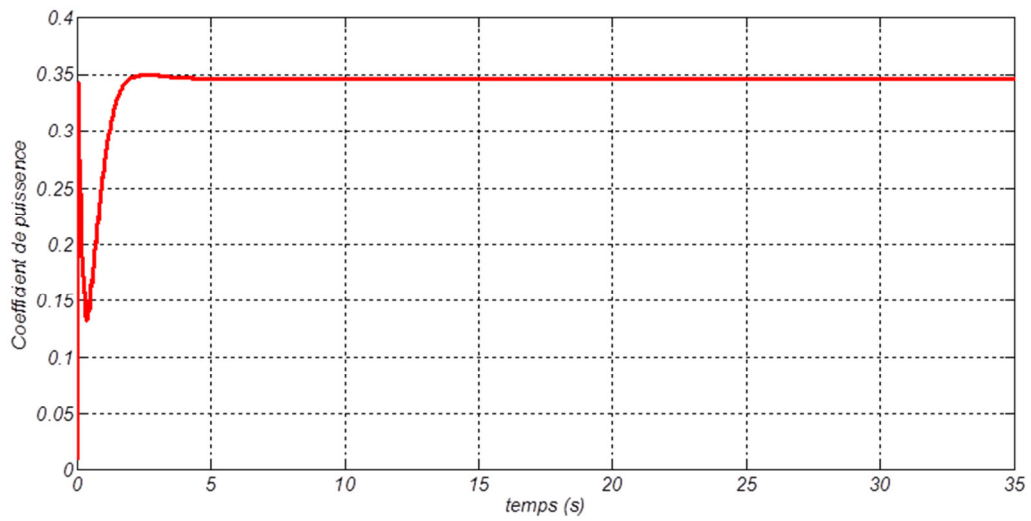


Figure III.2.2 : Allure du coefficient de puissance de la turbine

III.3.2 La vitesse mécanique de la turbine

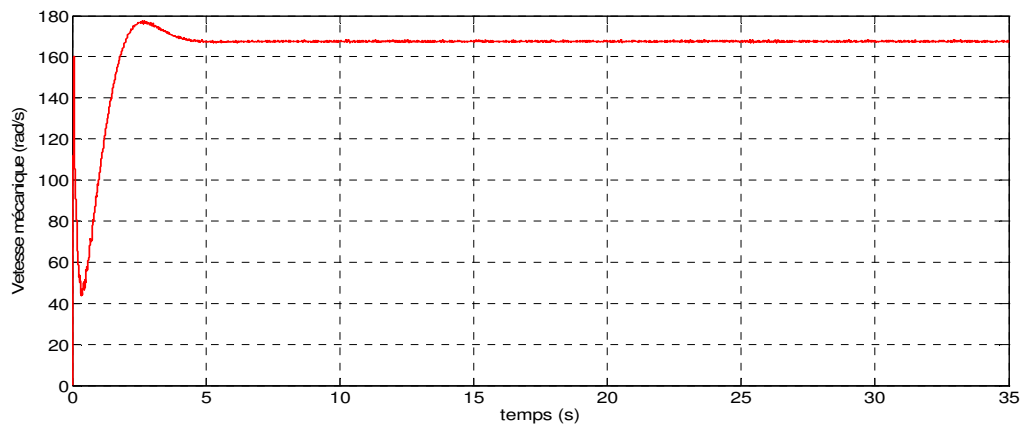
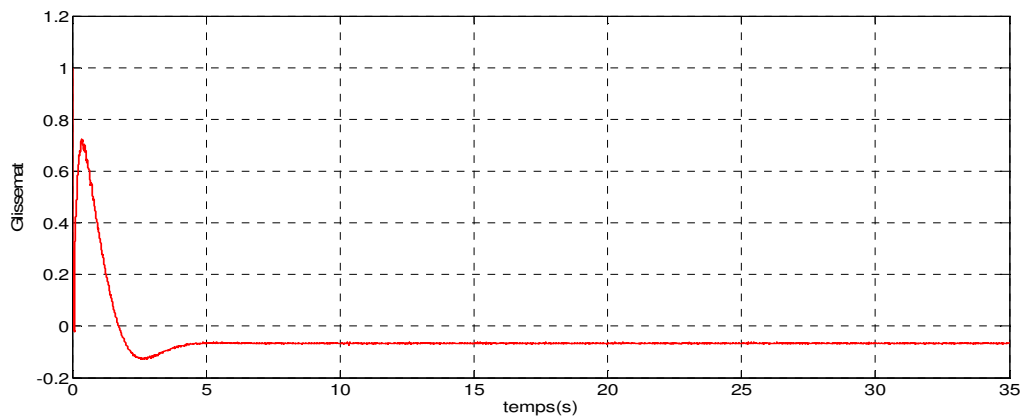


Figure III.2.3 : Allure de la vitesse mécanique de la turbine

III.3.3 Glissement de la génératrice

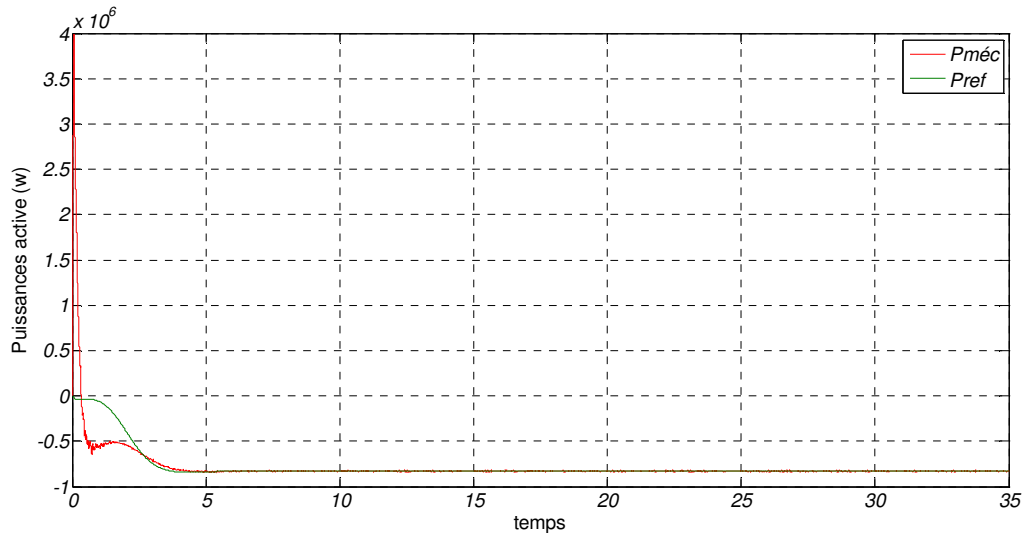
La Figure (III.2.4) illustre l'allure du glissement.



**Figure III.2.4 :** Allure du glissement de la génératrice

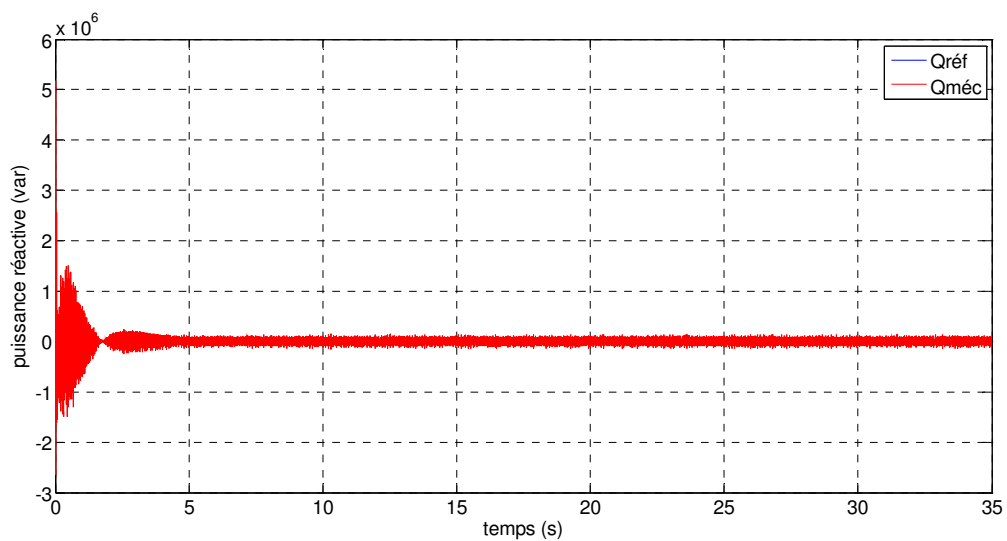
### III.3.4 La puissance active

D'après l'allure de la puissance visualisée (figure III.2.5), on constate qu'elle suit la puissance active de référence  $P_{ref}$  qui est négative.

**Figure III.2.5 :** Puissance active

### III.3.5 La puissance réactive

D'après la figure III.2.6 on constate que cette puissance suit la puissance réactive de référence  $Q_{ref}$  qui est nulle.

**Figure III.2.6 :** Puissance réactive

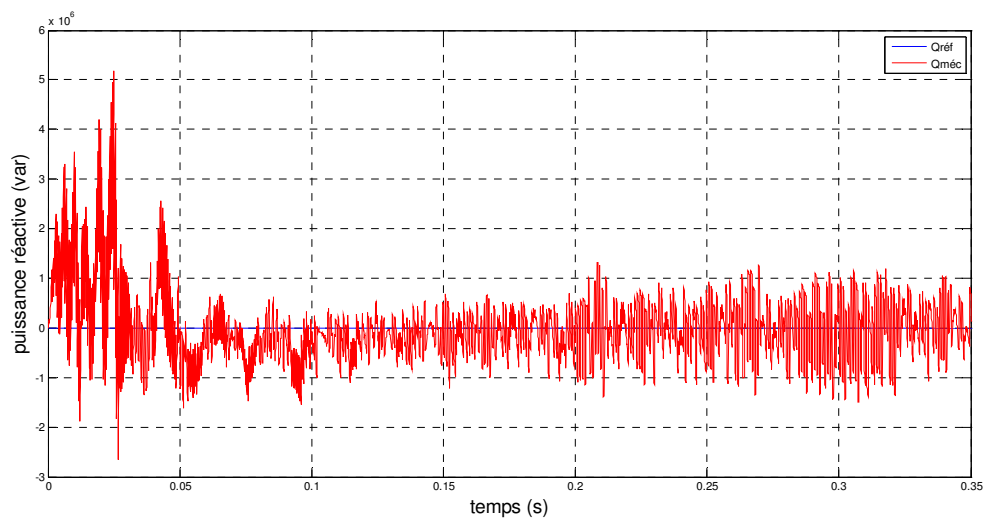


Figure III.2.7 : Zoom sur Puissance réactive

### III.3.6 Courants rotoriques

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

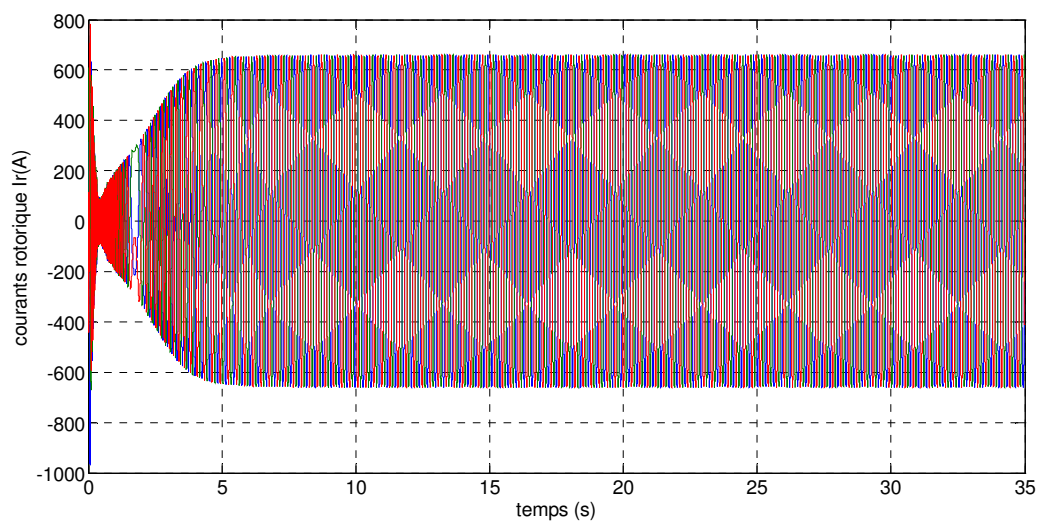


Figure III. 2.8 : Courants rotoriques

D'après l'allure de la figure (III.2.9) on constate que la forme des courants rotoriques sont sinusoïdaux et de même fréquence

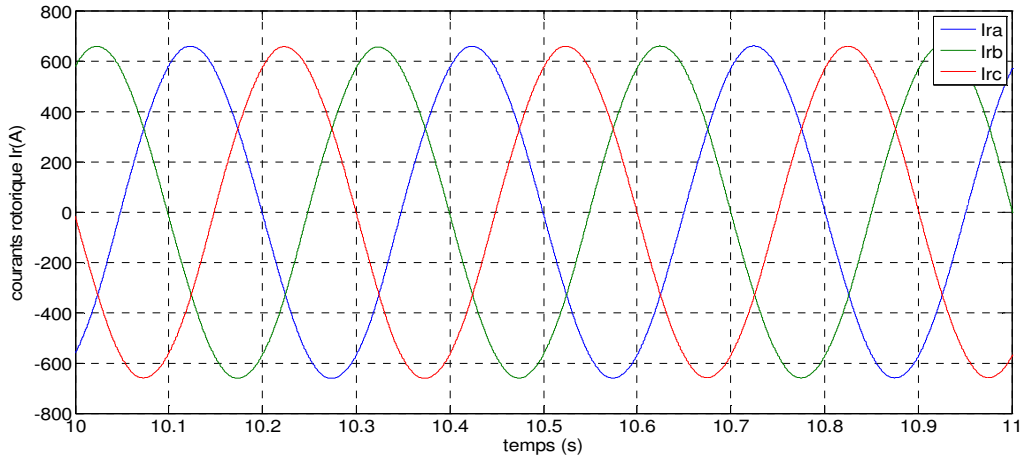


Figure III. 2.9 : Zoom sur les courants rotoriques

III.3.7 Couple électromagnétique

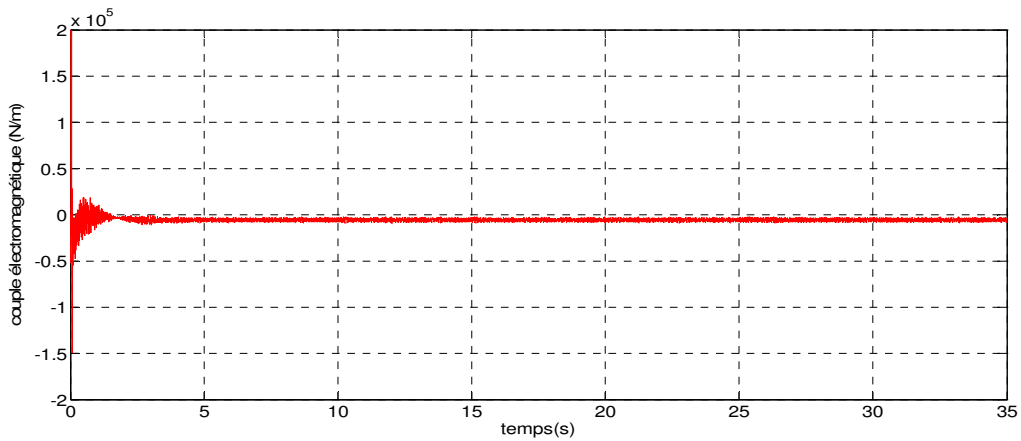


Figure III.2.10 : Allure de couple électromagnétique.

III.3.8 Tension de bus continu

La tension du bus continu est montrée sur la figure (III. 2.11)

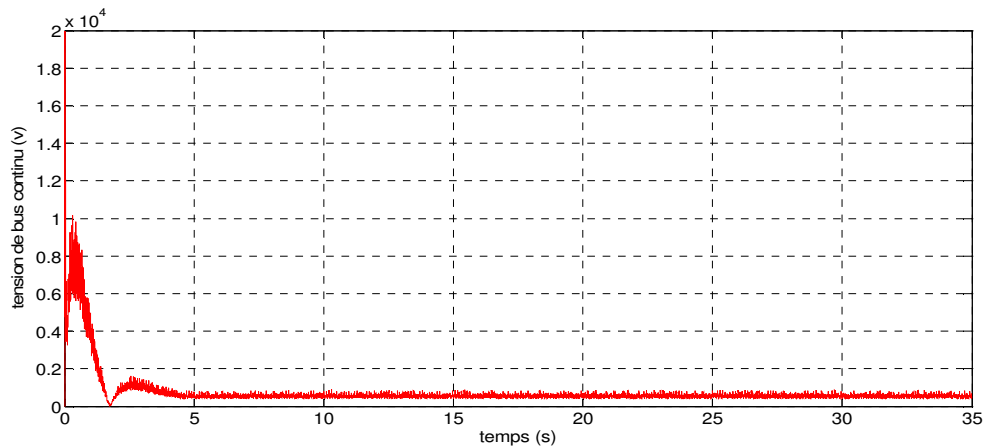


Figure III.2.11 : Allure de tension du bus continu.

III.4 Profil du courant marin (variable)

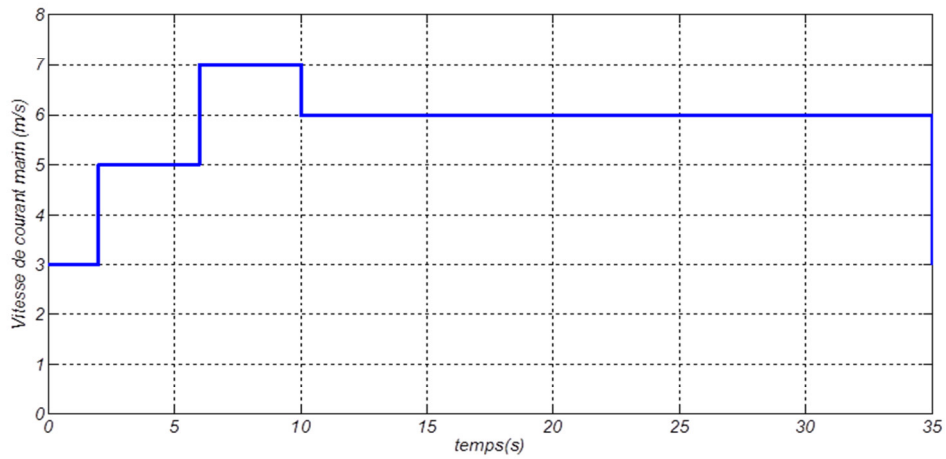


Figure III.3.1 : Allure du courant marin

III.4.1 Coefficient de puissance

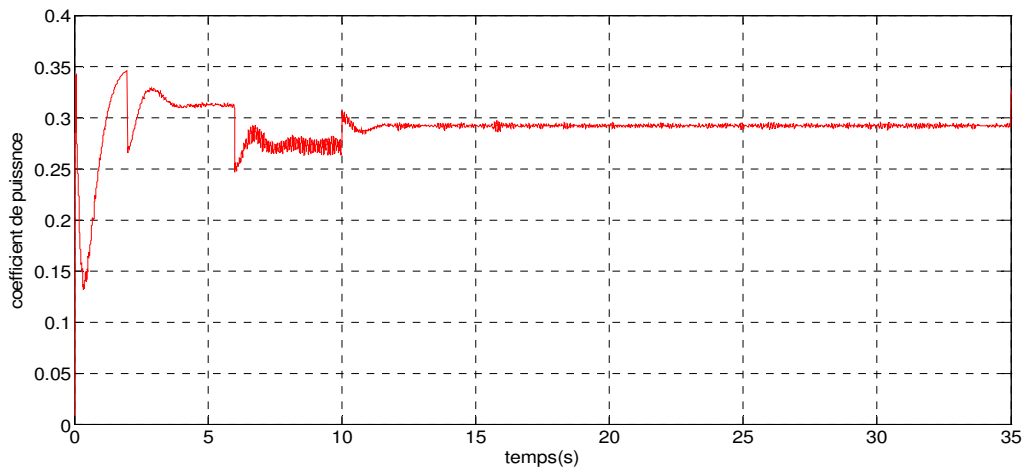


Figure III.3.2 : Allure du coefficient de puissance de la turbine

III.4.2 La vitesse mécanique de la turbine

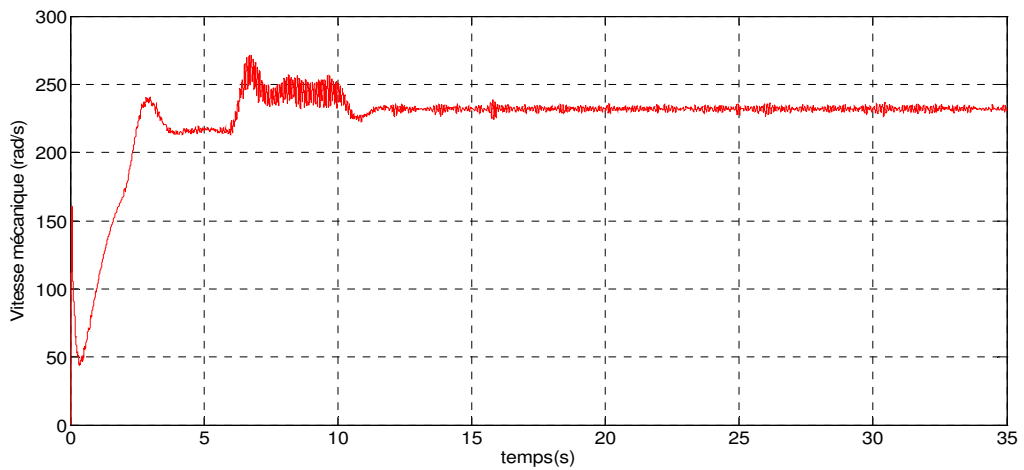


Figure III.3.3 : Allure de la vitesse mécanique de la turbine

III.4.3 La puissance active

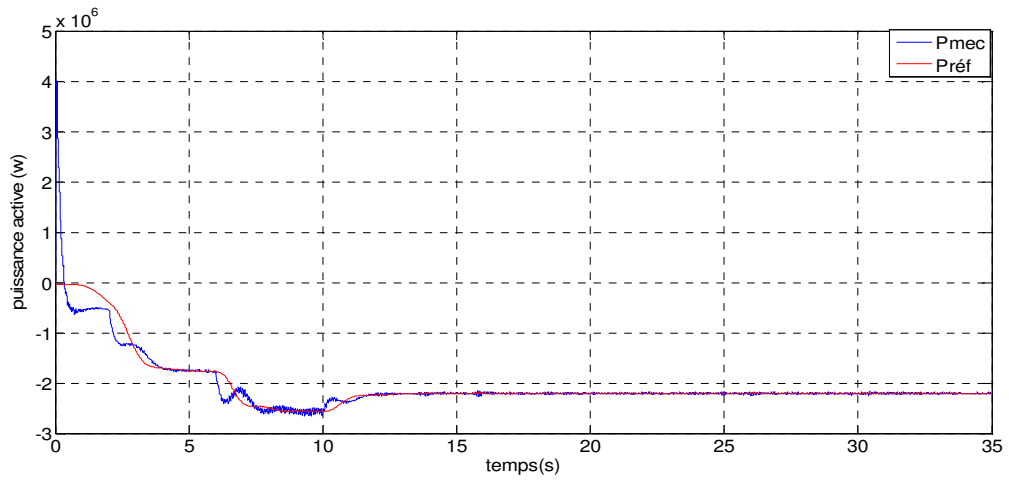


Figure III.3.4 : Puissance active

III.4.4 La puissance réactive

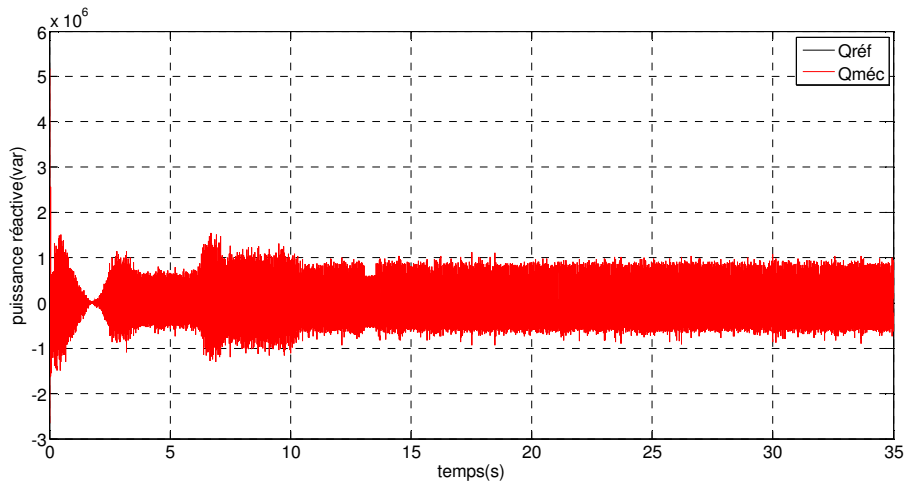


Figure III.3.5 : Puissance réactive

III.4.5 Glissement de la génératrice

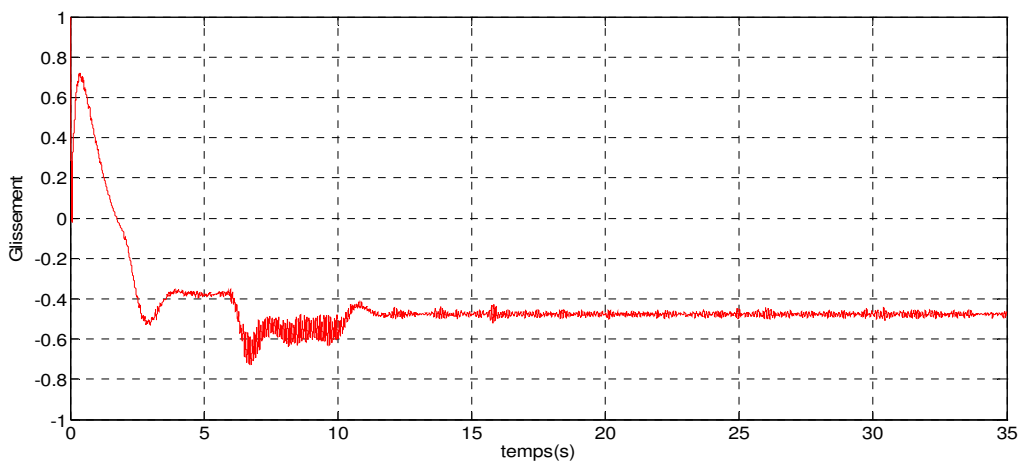


Figure III.3.6 : Allure du glissement de la génératrice

### III.4.6 Courants rotoriques

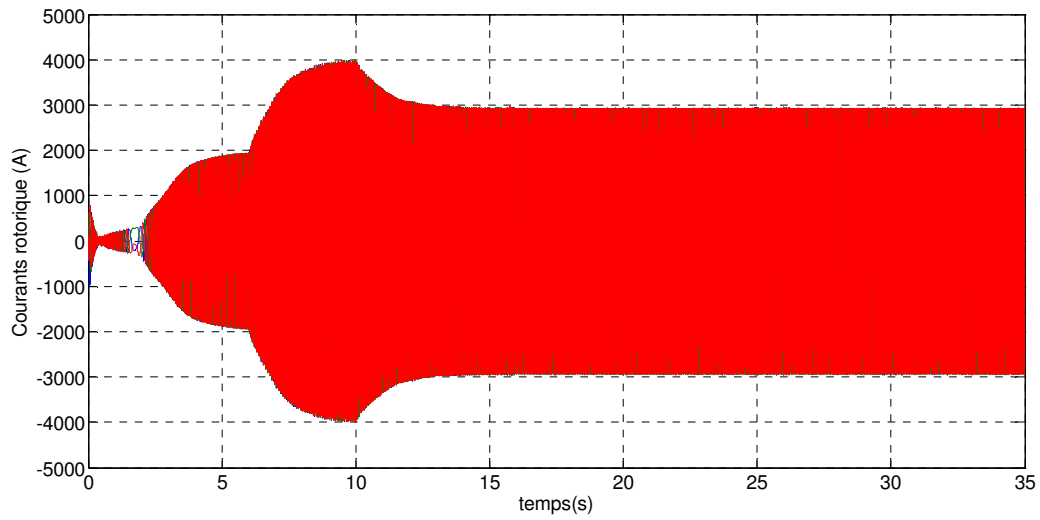


Figure III. 3.7 : Courants rotoriques

### III.4.7 Tension de bus continu

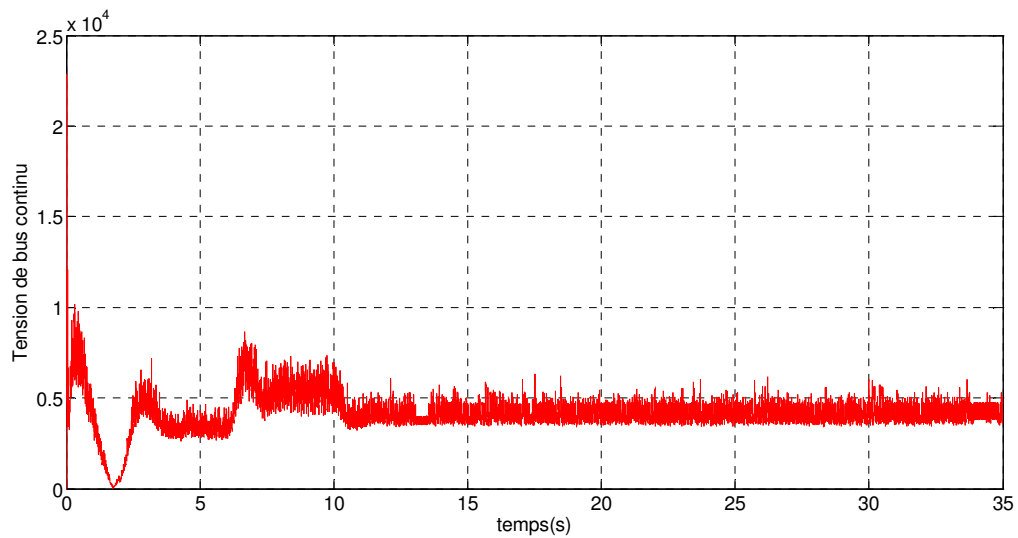


Figure III.3.8 : Allure de tension du bus continu

### III.5 Creux de tension

La figur (III.4.1) montrée un creux de tension de  $30\%U_n$  à l'instante  $t = 25(s)$  et de durée  $\Delta t = 800(ms)$  .



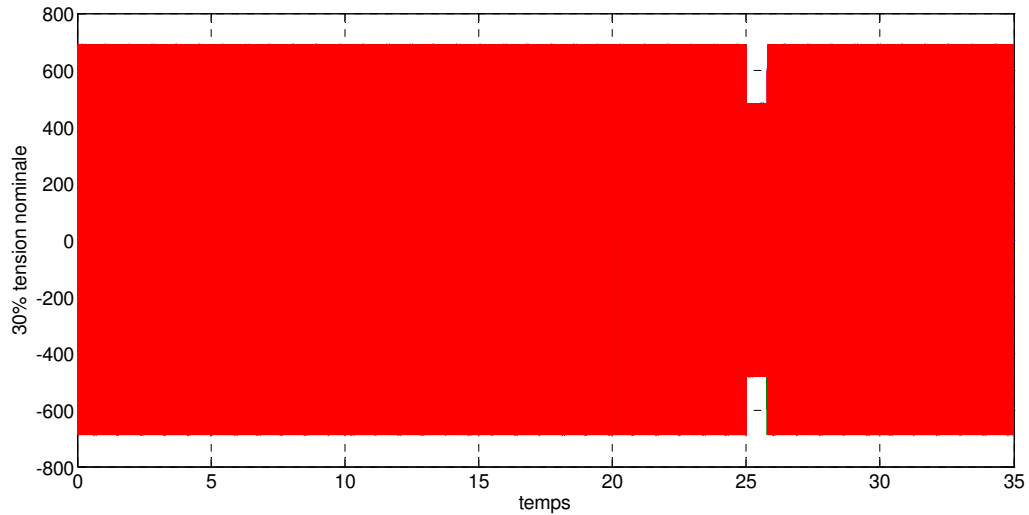


Figure III.4.1 : Creux de tension que passer les hydrolinnes

### III.5.1 La vitesse mécanique de la turbine

La figure III.4.2 montrée la variation de la vitesse mécanique pendant le défaut

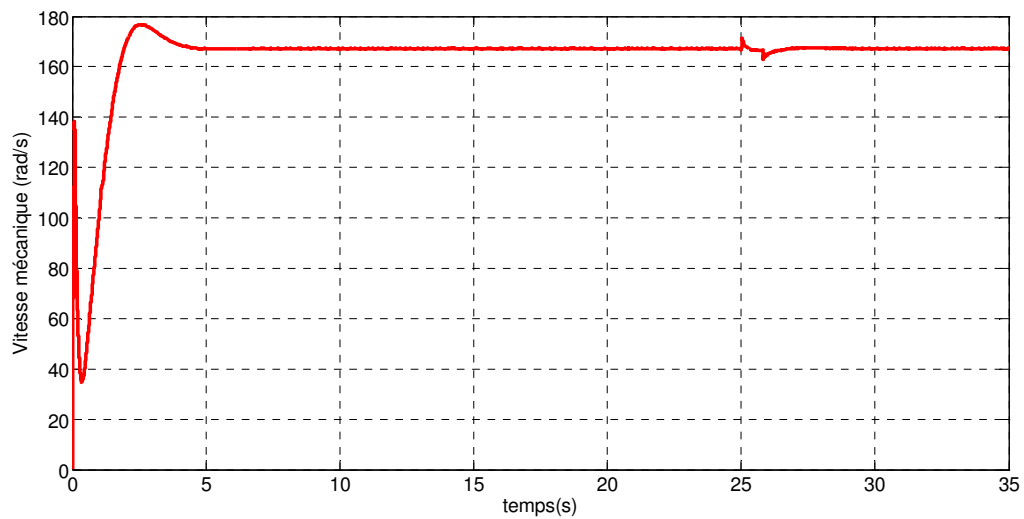


Figure III.4.2 : la vitesse mécanique de la turbine pendant le défaut

### III.5.2 Puissance active et réactive

La figure (III.4.3 et III.4.4) montrée les puissances également perturbées par le creux de tension.

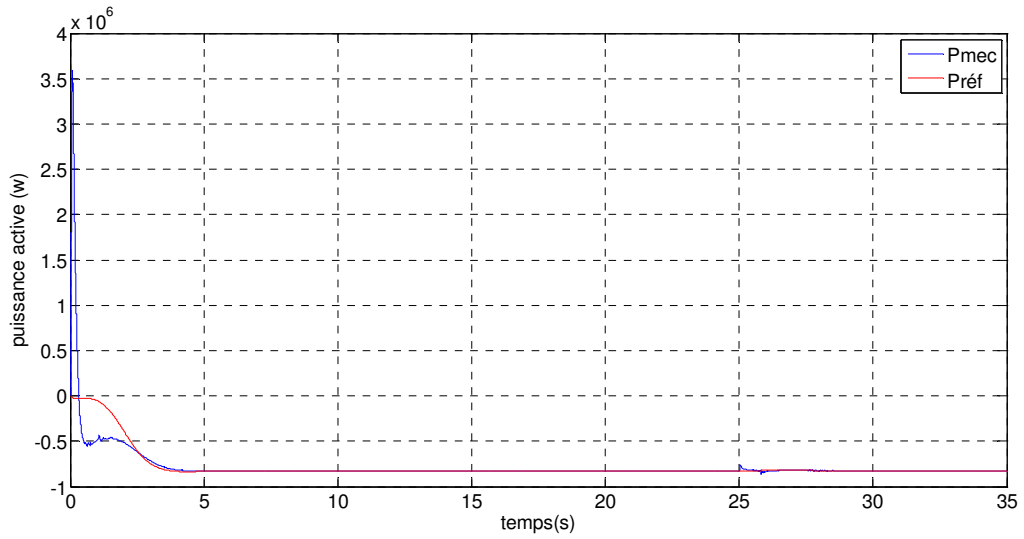


Figure III.4.3 : Puissance active avec un creux de tension

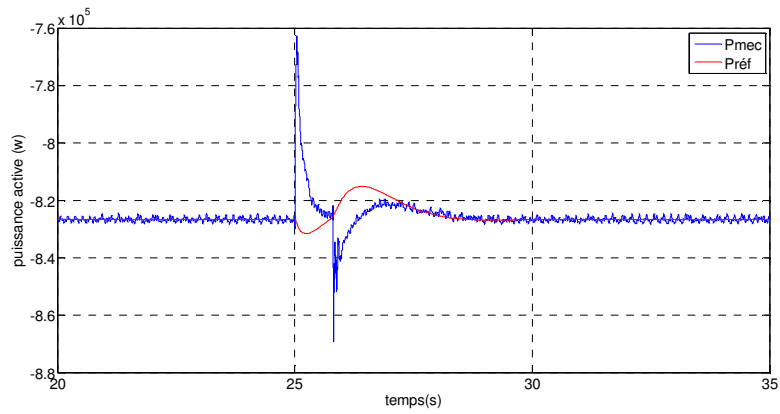


Figure III. 4.4 : Zoom sur les puissances active

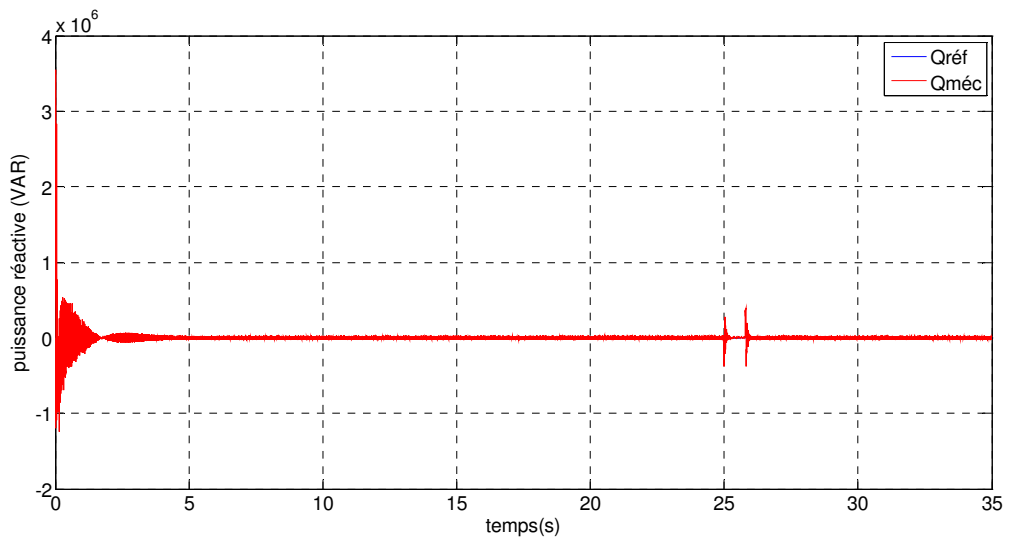


Figure III.4.5 : Puissance réactive avec un creux de tension

III.5.3 Courants rotoriques

La figure III.3.6 représente l'allure des courants rotoriques avec une creuse tension

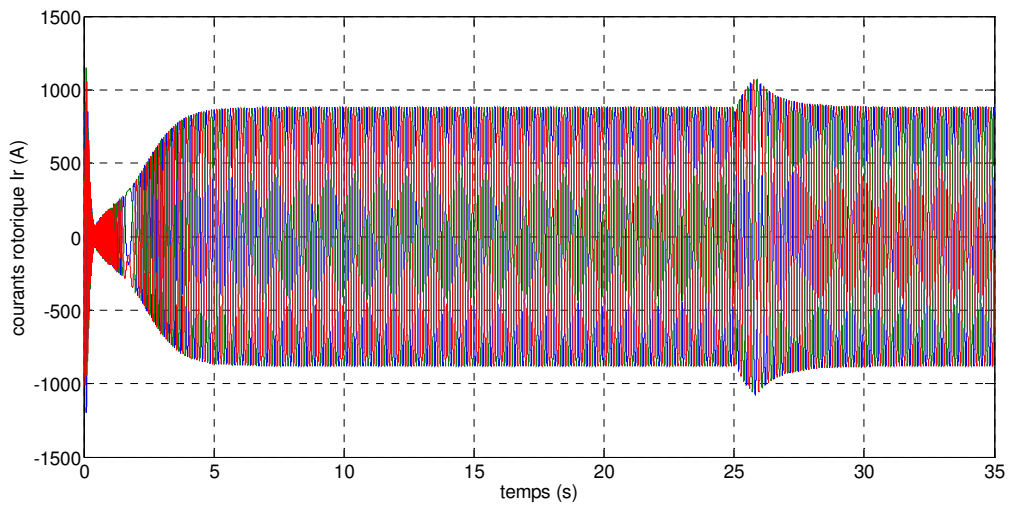


Figure III. 4.6 : Courants rotoriques pendant le défaut

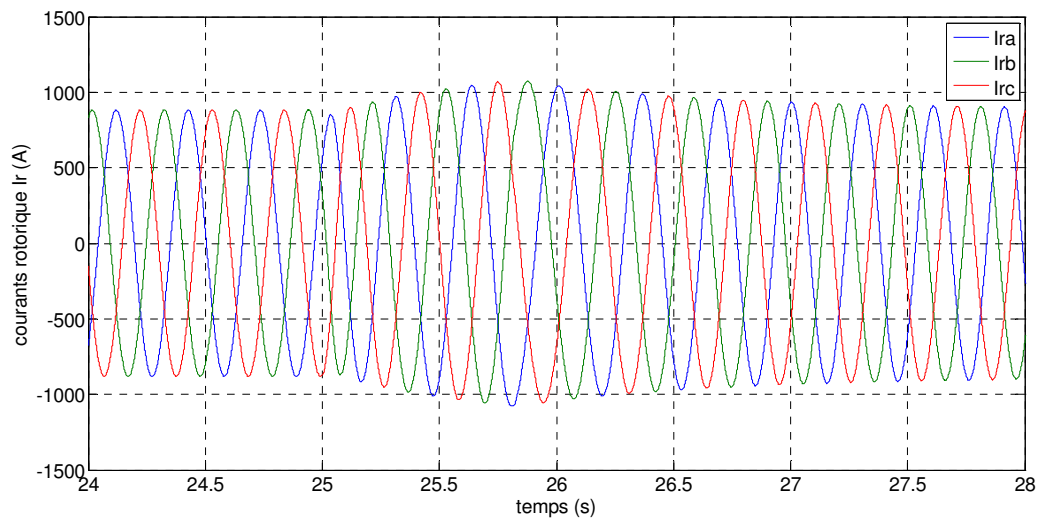


Figure III. 4.7 : Zoom sur les courants rotoriques

III.5.4 Couple électromagnétique

La figur III.8 montrée le Couple électromagnétique pendant le défaut

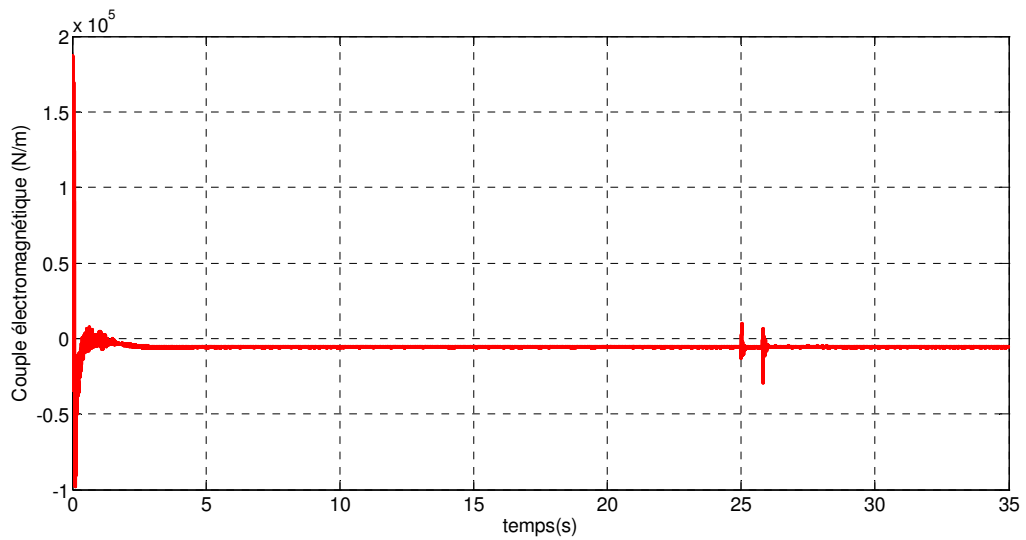
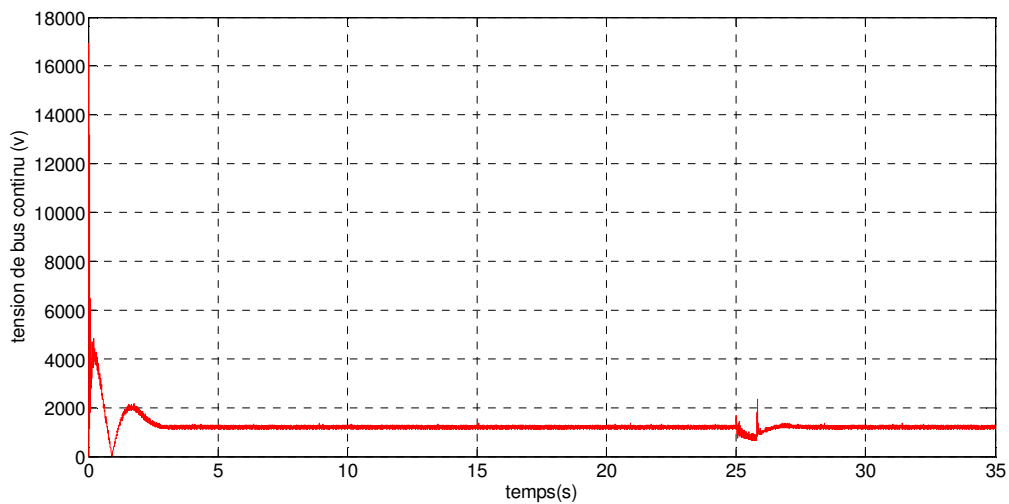


Figure III.4.8 : Allure de couple électromagnétique avec un creux de tension

### III.5.5 Tension de bus continu

La tension du bus continu est montrée sur la figure



figure(III.4.9) pendant le défaut

Figure III.4.9 : Allure de tension du bus continu avec un creux de tension

Les deux figures (II.2.1) et (III.3.1) représentée la vitesse de courant marin pour le défirant cas : constant et variable qui est extrémement important pour l'integration de hydrolienne au reseau électrique avec la commende MPPT apliquée l'hydrolienne doit fonctionné à  $C_{pmax} = 0,35$ .

La figure (III.3.2) illustre la variation  $C_p$  en remarque que ce dégrade lorsque la vitesse de courant marin important, si que montre l'influence des profile courant marin sur  $C_p$  de la turbine.

La vitesse mécanique de la turbine illustrée sur la figure (III.2.3) et (III.3.3) qui dépende directement de la vitesse de courant marin.

Les deux figures (III.2.4) et (III. 3.6) illustre la variation de glissement pour un profile de courant marin constant et variable ce que montre cliarement la perturbation qui crie le profile sur la génératrice ce qui génér des vibrations indésérables au fonctionnement de système

Les figures (III.2(5 .6)) et (III.3(4.5)) montrent les puissances active et réactive est la puissance active est de signe négatifv cela justifie que le stator génère de la puissance active et montre que les puissances varie en fonction de la vitesse de courant marine ce qui montre clairement la perturbation que crie le profil du courant marin sur la puissance mécanique de la turbine ce qui altère la qualité de l'énergie électrique..la figure (III.2.11) réprésente la tension de bus continu. et les figures (III.2.8) et (III.3 .7) réprésente les courants rotoriques qui sont varie en fonction de la vitesse de courant marin.

Le stator est conecte des rectement au réseau la machine detecte dans ce cas le defaut ceci explique la variation de la vitesse dela génératrice pendant le defaut que représente par figur (III.4.2).les grandeures électriques ( $P_{e}$  et  $U_c$ )qui représenté par les figures (III.4.5) et(III.4.9)sont également perturbés par le creux de tension.

### **III.6 Conclusion**

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

Les résultats de simulation obtenus correspondent parfaitement aux résultats attendus, cela justifie les modèles mathématiques développés aux chapitres précédents.

### 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 résultats de la simulation. L'objectif assigné à notre mémoire de fin d'étude et commande d'une chaîne de conversion hydrolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation. de ce fait notre travail est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des différentes structures du système hydrolien d'une part et la définition et caractéristiques d'une creux de tension d'autre part.

Le chapitre deux consacré à la modélisation du système de conversion hydrolienne à base de machine asynchrone à double alimentation. 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. Cette modélisation nous a permis d'aboutir à des schémas bloc qui seront exploités dans le dernier chapitre pour la simulation de système hydrolien global.

Le chapitre trois, a été consacré à la simulation sous Simulink/MATLAB de la chaîne de conversion, afin de justifier les modèles mathématiques développés au chapitre deux, D'après les résultats de la simulation, on a une concordance totale avec les résultats théoriques.

Les résultats obtenus par la simulation de système hydrolien global montre notamment la poursuite des références. De plus la puissance active injectée au réseau varie en fonction de la vitesse du courant marin et suit la puissance de référence cela justifie que la puissance injectée au réseau est celle récupérée par l'algorithme M.P.P.T. et montre l'influence d'un creux de tension sur le système hydrolienne.

[1] **S.E. Ben Elghali.** Modélisation et Commande d'une Hydrolienne Equipée d'une Génératrice Asynchrone Double Alimentation. JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.

[2] **Whipple,** Les Courants marins, Amsterdam, Time-Life, coll. « La Planète terre », p 176 ,1984 Dans ce livre Whipple a cité l'origine des courants marine, leurs déplacements et leurs impacts sur notre planète, et aussi les différents types de courants.

[3] **S.E. Ben Elghali et al.** "Les systèmes de génération d'énergie électrique à partir des courants de marée," Revue 3EI, n°52, pp. 73-85, Mars 2008.

Cette article nous donne une vue sur les différentes techniques pour récupérer l'énergie cinétique des courants marins, ainsi la définition de l'hydrolienne et son comportement, et les conditions pour l'implantation des hydroliennes.

[4] « **Energie hydrolienne** » On line:

<http://fr.ekopedia.org/Hydrolienne>

[5] « **Energie hydrolienne** » On line :

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrolienne>.

[6] **DANSOKO Mamadou** « Modélisation et commande non linéaire des hydroliennes couplées à un réseau électrique », thés doctorat, université de paris 13 le 11/12/2014.

[7] **MONJEAN Pascal** « Optimisation de l'architecture et des flux énergétique de centrales à énergies renouvelables offshore et onshore équipées de liaisons en continu », thés doctorat, l'école nationale supérieure d'arts et métiers (paris), le 26 /12/2012.

[8] **les hydrolienne.**

[Pierre.Hautefeuille .free.fr/TPE/Energie courant.htm](http://Pierre.Hautefeuille.free.fr/TPE/Energie_courant.htm)

Hydrolienne est seul projet français réalisé

Marine courant turbine est la première société avoir créé une hydrolienne

[9] Ce document présente les différentes solutions d'énergie renouvelable de la mer et en particulier les hydroliennes.

[http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/mp/proceedings\\_pdf/presentations/1.%20contexte/ECRIN.pdf](http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/mp/proceedings_pdf/presentations/1.%20contexte/ECRIN.pdf)

[10] [http://generationsfutures.chez.tiscali.fr/obj\\_renouvelable/hydrolienne.htm](http://generationsfutures.chez.tiscali.fr/obj_renouvelable/hydrolienne.htm)

Ces documents très complets montrent l'avancement des projets hydroliens en France et notamment en Bretagne.

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

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

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

[14] **F. POITIERS**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de Doctorat de l'Universités de Nantes, France 19 Décembre 2003.

[15] **PENG Ling** « Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension » Thèse de Doctorat de L'école centrale de Lille. France 17 juin 2010.

[16] **B. ELGHALI**, « Modélisation et commande d'une hydrolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation » Université de Brest.

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



[17] **M. ANDREICA, S. BACHA, D. ROYE ET J. GUIRAUD**, «Intégration d'une hydrolienne au réseau, MPPT et qualité de l'énergie » Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble

[18] **F. MERRAHI**, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) » Mémoire de magister Ecole nationale Polytechnique.

[19] **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.

[20] **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

---

## Annexe

### ➤ La machine :

- Tension d'alimentation :  $V_S = 690V$  50 Hz
- Puissance nominale : 790 KW
- Résistance d'enroulement statorique :  $R_S = 0.012\Omega$
- Résistance d'enroulement rotorique :  $R_R = 0.021\Omega$
- Inductance cyclique statorique :  $L_S = 0.0137$  H
- Inductance cyclique rotorique :  $L_R = 0.0136$  H
- Inductance magnétisante :  $M = 0.0135$  H
- Nombre de paire de pôles :  $P=2$

### ➤ La turbine :

- Rayon de l'hélice :  $R = 10$  m
- Nombre de pales :  $P= 3$
- Gain de multiplicateur de vitesse :  $G= 50$
- Inertie totale :  $J = 50$  Kg/m
- Coefficient de frottement visqueux :  $f = 7.1 \cdot 10^{-3} Nm_S / r_d$
- Masse volumique de l'eau :  $\rho = 1024$  Kg/m<sup>3</sup>

### ➤ Paramètres du bus continu :

- Valeur de la capacité :  $C= 400$   $\mu F$
- Valeur de l'inductance de lissage :  $L=0.08$  H

Listes des figures

*Chapitre I*

**Figure I.1** : Potentiel énergétique hydrolienne dans le monde..... 03

**Figure I.2** : Conversion de l'énergie cinétique du courant marin..... 03

**Figure I.3** : Principe de fonctionnement d'une hydrolienne..... 04

**Figure I.4** : Composants d'un générateur hydrolien..... 05

**Figure I.5** : Les hydroliennes à axe horizontal ..... 06

**Figure I.6** : Les hydroliennes à axe vertical ..... 06

**Figure I.7** : La technologie à aile battante ou oscillante..... 07

**Figure I.8** : Les hydroliennes utilisant une roue à aubes flottantes ..... 08

**Figure I.9** : Hydroliennes à effet Venturi ..... 08

**Figure I.10** : Comparaison entre une hydrolienne et une éolienne de même puissance 1M W ..... 10

**Figure I.11** : Maintenance d'une hydrolienne a l'aide d'un bateau ..... 11

**Figure I. 12** : Plongeurs pour la maintenance (gauche) et utilisation de robots (droite) ... 12

**Figure I.13** : Veine de courant marin a la traversée de l'aéromoteur..... 13

**Figure I.14** : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un courant de 2 m/s..... 16

**Figure I.15** : Courbe de puissance en fonction de la vitesse mécanique (stratégie MPPT) ..... 17

**Figure I.16** : Limitation de la puissance en fonction de la vitesse de marée..... 17

**Figure I.17** : Structure de la chaine de conversion utilisant une MSAP couplé au réseau 20

<b>Figure I.18 :</b> Système hydrolienne utilisant la MADA avec control de glissement par dissipation d'énergie rotorique .....	21
<b>Figure I.19 :</b> Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI .....	22
<b>Figure I.20 :</b> Caractérisation d'un creux de tension .....	24
 <b>Chapitre II</b>	
<b>Figure II.1 :</b> Schéma globale d'une chaine de conversion hydrolienne .....	26
<b>Figure II.2 :</b> Schéma de la turbine éolienne .....	27
<b>Figure II.3 :</b> Caractéristique $C_p(\lambda)$ pour divers valeur de $\beta$ .....	28
<b>Figure II.4 :</b> Modèle mécanique simplifié du multiplicateur .....	28
<b>Figure II.5 :</b> Modèle de l'aérogénérateur .....	31
<b>Figure II.6 :</b> Coefficient de puissance $C_p$ en fonction de rapport de vitesse $\lambda$ .....	32
<b>Figure II.7 :</b> Le schéma bloc du modèle de la turbine avec MPPT sans asservissement de la vitesse .....	33
<b>Figure II.8 :</b> Structure de la MADA .....	34
<b>Figure II.9 :</b> Fonctionnement en mode génératrice .....	34
<b>Figure II.10 :</b> Représentation schématique de la MADA.....	35
<b>Figure II.11 :</b> Passage du triphasé au biphasé .....	38
<b>Figure II.12 :</b> Principe du contrôle vectoriel .....	41
<b>Figure II.13 :</b> Schéma bloc de la MADA .....	44
<b>Figure II.14 :</b> Redresseur MLI .....	45
<b>Figure II.15 :</b> Représentation du filtre.....	46
<b>Figure II.16 :</b> Représentation schématique d'un onduleur .....	46
<b>Figure II.17 :</b> Schéma de principe de la MLI naturelle .....	48

***Chapitre III***

<b>Figure III.1</b> : Schéma structurel de la commande de système hydrolienne globale .....	50
<b>Figure III.2.2</b> : Allure du coefficient de puissance de la turbine .....	51
<b>Figure III.2.3</b> : Allure de la vitesse mécanique de la turbine.....	51
<b>Figure III.2.4</b> : Allure du glissement de la génératrice .....	51
<b>Figure III.2.5</b> : Puissance active.....	52
<b>Figure III.2.6</b> : Puissance réactive .....	52
<b>Figure III.2.7</b> : Zoom sur Puissance réactive .....	53
<b>Figure III.2.8</b> : Courants rotoriques .....	53
<b>Figure III.2.9</b> : Zoom sur les courants rotoriques .....	54
<b>Figure III.2.10</b> : Allure de couple électromagnétique.....	54
<b>Figure III.2.11</b> : Allure de tension du bus continu.....	54
<b>Figure III.3.1</b> : Allure du courant marin .....	55
<b>Figure III.3.2</b> : Allure du coefficient de puissance de la turbine .....	55
<b>Figure III.3.3</b> : Allure de la vitesse mécanique de la turbine.....	55
<b>Figure III.3.4</b> : Puissance active.....	56
<b>Figure III.3.5</b> : Puissance réactive .....	56
<b>Figure III.3.6</b> : Allure du glissement de la génératrice .....	56
<b>Figure III.3.7</b> : Courants rotoriques .....	57
<b>Figure III.3.8</b> : Allure de tension du bus continu.....	57
<b>Figure III.4.1</b> : Creux de tension que passer les hydrolinnes.....	58
<b>Figure III.4.2</b> : la vitesse mécanique de la turbine pendant le défaut .....	58
<b>Figure III.4.3</b> : Puissance active avec un creux de tension .....	59
<b>Figure III.4.4</b> : Zoom sur les puissances active .....	59

<b>Figure III.4.5</b> : Puissance réactive avec un creux de tension .....	59
<b>Figure III.4.6</b> : Courants rotoriques pendant le défaut.....	60
<b>Figure III.4.7</b> : Zoom sur les courants rotoriques .....	60
<b>Figure III.4.8</b> : Allure de couple électromagnétique avec un creux de tension .....	61
<b>Figure III.4.9</b> : Allure de tension du bus continu avec un creux de tension .....	61

## Liste Des Symboles

V	La vitesse du courant marin (m/s)
$\rho$	La densité volumique de l'eau ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
S	La surface balayée par la turbine ( $\text{m}^2$ )
$P_t$	Puissance de la turbine.
$C_p$	Le coefficient de puissance de l'éolienne
$\lambda$	Rapport de vitesse en bout des pâles
$\beta$	L'angle de calage
$\Omega_t$	vitesse de rotation de la turbine (rad/s)
R	rayon de la turbine ( m )
$C_t$	Le couple de la turbine éolienne
$\Omega_{\text{méc}}$	La vitesse mécanique de la génératrice
G	Le gain du multiplicateur
$C_{\text{méc}}$	Le couple mécanique sur l'axe rapide de la turbine
$J_t$	Inertie de la turbine éolienne ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )
$J_g$	Inertie du rotor de la génératrice
J	L'inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ).
f	Coefficient de frottement dynamique ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
$C_{\text{em}}$	Couple électromagnétique (N.m)
$C_r$	Couple résistante.

$[V_s], [V_r]$	Vecteur tension statorique et rotorique.
$[i_s], [i_r]$	Vecteur courant statorique et rotorique.
$[\varphi_s], [\varphi_r]$	Vecteur flux statorique et rotorique.
$R_s$	Résistance de chaque enroulement du stator.
$R_r$	Résistance de chaque enroulement du rotor.
$M_{sr}, M_{rs}$	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.
$[L_{ss}], [L_{rr}]$	Matrices d'inductances statorique et rotorique.
$l_s, l_r$	Inductance cyclique statorique et rotorique de la machine.
$M_s, M_r$	Inductances mutuelles entre deux phases du stator et du rotor respectivement
$M_{max}$	La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor.
$p$	Le nombre de paires de pôles de la MADA.
$[A(\theta)]$	La matrice de Park
$[A(\theta)]^{-1}$	La matrice inverse de Park
$\theta$	Angle d'observation de la matrice de Park
$\theta_s, \theta_r$	Angle du stator et du rotor.
$V_{ds}, V_{qs}$	Tensions statorique dans le repère (d q).
$V_{dr}, V_{qr}$	Tensions rotorique dans le repère (d q).
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux statorique dans le repère (d q).
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotorique dans le repère (d q).
$\omega$	Pulsation de rotation électrique ( $\omega = p\Omega$ )
$\omega_s, \omega_r$	Pulsation électrique des grandeurs statorique et rotorique respectivement.
$M$	Inductance magnétisante de la machine.
$i_{sd}, i_{sq}$	Courants statorique dans le repère (d q).
$i_{dr}, i_{qr}$	Courants rotoriques dans le repère (d q).



$P_s$  Puissance active statorique.

$Q_s$  Puissance réactive statorique.

$U_{dc}$  Tension redressée.

### **Abréviation**

MADA Machine Asynchrone à Double Alimentation.

MLI Modulation à Largeur d'Impulsions.