

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Badji Mokhtar Annaba
Faculté des Sciences et l'ingénierie



Département d'Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

Présenté par :

Amine Achou et Hamza Manseri

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème :

Systeme Hybride Eolien- Hydrolienne
connecté au réseau

Soutenu publiquement le 21/06/2018 devant la commission d'examen composée de:

Mr.Abderrezak Abdallah Président

Mr.Labar Hocine Rapporteur

Mr.Mesbah Tarek Examineur

Année universitaire : 2017/ 2018

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

À nos Mères,

À nos Pères

À nos frères, nos sœurs et nos amis

À notre encadreur et tous les profs de licence et Master

REMERCIEMENTS

Avant tout, merci pour Dieu qui nous a protégés et permis de succéder dans notre vie.

On veut remercier notre encadreur Professeur

Labar Hocine

Tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation

Tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Et surtout nos PARENTS qui nous ont beaucoup motivés durant les années d'étude.

Liste des figures

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Figure I.2 : Représentation des concepts d'éoliennes (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical

Figure I.3 : Représentation des éoliennes en amont et en aval

Figure I.4 : Types de fondations structures

Figure I.5 : principe de fonctionnement autour d'une éolienne

Figure I.6 : Simulation de la vitesse aléatoire de vent (a) distribution de Wei bull (b) Signal généré (avant et après filtrage)

Figure I.7 : tube de courant autour d'une éolienne

Figure I.8 : (a) Modèle de la turbine (b) vitesse de rotation en fonction de puissance convertie

Figure I.9 : Modélisation de la transmission mécanique de l'éolienne

Figure I.10 : Flux d'air sur un des pales (stall)

Figure I.11 : Variation de l'angle de calage d'une pale

Figure I.12 : Courbe typique de régulation

Figure I.13 : système éolienne sous Matlab

Figure I.14 : les résultats de la simulation de la puissance P et Q

Figure I.15 : représente la vitesse de vent dans la zone de la mer Méditerranée

Figure II.16 : Les différentes parties d'une hydrolienne

Figure II.17 : principe de fonctionnement

Figure II.18 : Modèle expérimental

Figure II.19 : Résultat de l'expérience

Figure II.20 : Les courants marins

Figure II.21 : Schéma global d'une chaîne de conversion hydro-cinétique utilisant une hydrolienne

Figure II.22 : Découpage de la pale en secteurs élémentaires

Figure II.23 : a) exemple d'hydrolienne tripale; b) maillage des pales

Figure II.24: a) coefficient de puissance C_p (λ , $V_{marée}$) ; b) puissance utile P (ω , $V_{marée}$) pour une hélice tripale de 1,44 m de diamètre.

Figure II.25 : le modale de la hydrolienne sous Matlab

Figure II.26 : les résultats de la simulation

Figure II.27 : représente les courants d'eaux dans la mer Méditerranée

Figure III.28 : Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA

Figure III.29 : cascade hypo synchrone

Figure III.30 : Configuration des enroulements et des flux dans une machine synchrone et dans une MADA

Figure III.31 : MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances

Figure III.32 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Figure III.33 : caractéristique de production d'énergie optimale de la MADA et de la machine à cage

Figure III.34 : MADA avec quatre boucles de régulation

Figure III.35: MADA avec convertisseurs statoriques et rotoriques

Figure IV.36 : système globale éolien-hydrolienne

Figure IV.37 : Inductance commandée

Figure IV.38 : représente le système global sous Matlab

Figure IV.39 : Variation des puissances active et réactive

Figure IV.40 : puissances active et réactive avec compensation

Figure IV.41 : représente la puissance réactive du compensateur

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et à axe vertical

Tableau I.2 : échelle Beaufort

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur le système éolienne.....	2
I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition de l'éolienne.....	2
I.3. Les différents types d'éolienne.....	3
I.4. Les principales parties d'éolienne.....	3
I.5. Principe de fonctionnement d'éolienne.....	3
I.6. Modélisation de la chaîne de production.....	4
I.6.1. Configuration de l'éolienne.....	4
I.6.2. Quelques notions sur le vent	5
I.6.3. Modélisation du vent	5
I.6.4. Modélisation de production de la puissance éolienne.....	6
I.6.5. La transmission mécanique	9
I.6.6. Système de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....	10
I.7. Modèle éolien en Matlab/Simulink	13
I.7.1. Résultats de simulation.....	14
I.8. Résumé.....	14

Chapitre II : Généralité sur le système hydrolienne	15
II.1. Introduction	
II.2. Définition	15
II.3. les différents types d'hydrolienne.....	16
II.4. Les différentes parties d'une hydrolienne	16
II.5. Le fonctionnement d'une hydrolienne.....	17
II.6. Les courants des marées	18
II.7. Modélisation de la chaine de production.....	18
II.7.1. Modélisation des courants marins.....	18
II.7.2. Modélisation de la production de l'hydrolienne	20
II.7.3. Modélisation hydrodynamique de la turbine.....	21
II.8. Modèle hydrolienne en Matlab/Simulink.....	23
II.8.1. Résultats de simulation.....	24
II.9. Résumé.....	24

Chapitre III : Modélisation de la machine à double alimentation (MADA)	25
III.1.Introduction.....	25
III.2. Topologie et emploi des machines asynchrones à double alimentation...	25
III.2.1. Structure des machines asynchrones à double alimentation.....	26
III.2.2. Application des machines asynchrones à double alimentation.....	27
III.3. Fonctionnement en génératrice à vitesse variable.....	29
III.4. Modélisation et différentes méthode de commande de la MADA.....	32
III.4.1. Modèle et Identification des paramètres de la machine	32
III.4.2. différentes méthode de commande de la MADA	33
III.5. Résumé.....	34
Chapitre IV : Présentation du système globale éolien-hydrolienne.....	36
IV.1. Introduction.....	36
IV.2. Le système global sous Matlab.....	38
IV.2.1. Résultats de simulation.....	38
IV.3. Résumé.....	39
Conclusion générale et perspective.....	41
Bibliographie	42

Introduction générale

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer. Vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies, la multiplication des appareils domestiques de plus en plus gourmands en consommation d'énergie électrique, la demande en énergie électrique est devenue très importante. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques traditionnelles, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergies nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergies renouvelables (EnR en abrégé) sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humain. L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

Parmi ces sources d'énergies, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans le domaine sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, l'Espagne 6202 MW, le Danemark 3110 MW, la Hollande 912 MW et l'Amérique du nord 6677 MW. Avec certains projets d'énergies éoliennes développées offshore et hydrolienne.

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

L'intérêt de ce travail est de maintenir un niveau de fiabilité avec un coût minimale grâce à un dimensionnement optimale de système hybride (éolien – hydrolienne) pour cette raison on présente une méthode de dimensionnement optimale d'un système hybride de production d'électricité avec un niveau de fiabilité fixé.

Pour cela :

Le premier chapitre présente la description générale du modèle éolien et sa modélisation et son principe de fonctionnement avec les résultats de simulation en Matlab /Simulink.

Le deuxième chapitre présente la description générale du modèle hydrolienne et sa modélisation et son principe de fonctionnement avec les résultats de simulation en Matlab /Simulink.

Le troisième chapitre présente la modélisation d'une génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) à vitesse variable ainsi que les différentes méthodes de commande utilisées et ses applications.

Le quatrième chapitre présente l'hybridation des systèmes éoliens-hydroliennes avec les résultats de simulation en Matlab /Simulink.

Nous terminerons ce modeste travail par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I

Généralité sur le système éolienne

I.1. Introduction :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante.

I.2. Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle est généralement utilisée pour produire de l'électricité et entre dans la Catégorie des énergies renouvelables. (figure 1)

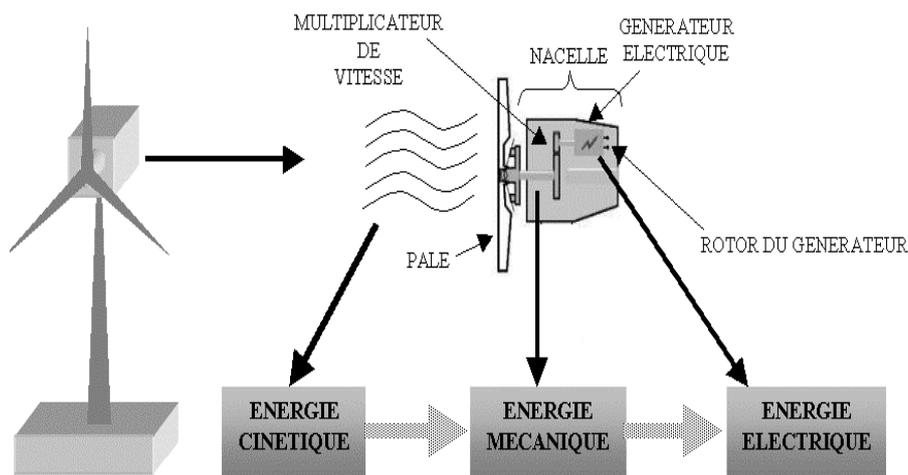


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.3. les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal (figure 2)

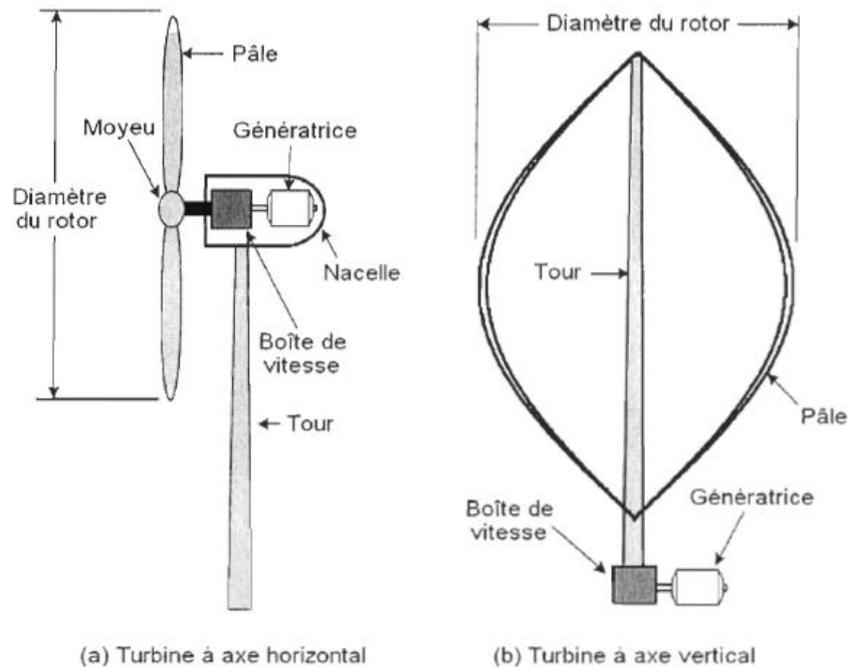


Figure I.2 : Représentation des concepts d'éoliennes (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical

I.3.1. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont composées principalement d'une tour au sommet de laquelle une nacelle est installée. Cette nacelle supporte le rotor de la turbine - moyeu et pales – et comporte le système d'entraînement ainsi que la génératrice. L'axe de rotation du rotor de la turbine est donc horizontal.

On peut distinguer deux groupes:

- **les éoliennes à rotation lente (multipales)**

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent exclusivement au pompage de l'eau.

- **Les éoliennes à rotation rapide (Aérogénérateurs)**

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "d'aérogénérateurs".

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ». (figure 3)

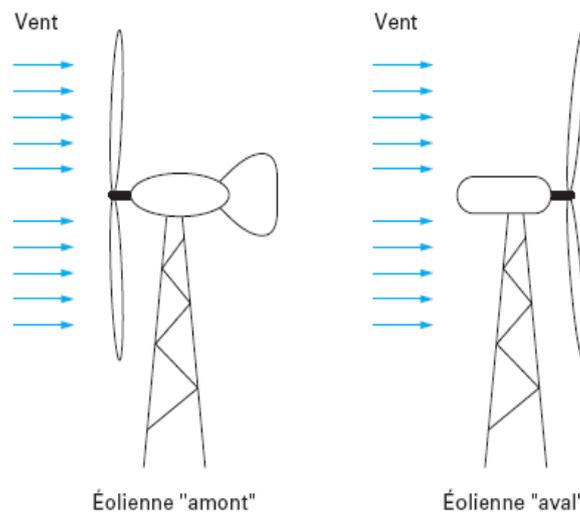


Figure I.3 : Représentation des éoliennes en amont et en aval

I.3.2. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical, l'axe de rotation du rotor est perpendiculaire au sol. Ceci permet de placer le système d'entraînement ainsi que la génératrice au niveau du sol. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

- Ces deux méthodes de captation de l'énergie disponible dans le vent ont leurs avantages et leurs inconvénients. Ceux-ci sont présentés au Tableau 1.

Type d'éolienne	Avantage	Inconvénients
Axe Horizontal	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficacité de conversion d'énergie élevée. ▪ Autodémarrage possible ▪ Rotor positionné en hauteur donnant accès à des vents élevés 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût d'installation élevé ▪ Nécessite une tour robuste ▪ Nécessite de longs câbles électriques
Axe Vertical	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût d'installation réduit ▪ Maintenance des équipements plus aisée ▪ Ne nécessite pas dispositif d'orientation de la turbine dans l'axe du vent 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficacité de conversion d'énergie faible ▪ Haute variation du couple mécanique et des forces sur les éléments des pales ▪ Doit démarrer en moteur ▪ Options limitées pour le contrôle de la vitesse ou de la puissance

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et à axe vertical

I.4. les principales parties de l'éolienne :

Une éolienne rapide est constituée principalement de trois parties : les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

- **La tour** est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur

- **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.
- **le rotor**, partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute.
- **Une armoire de commande**, comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.
- **Un multiplicateur de vitesse**, un radiateur de refroidissement et un système de freinage.
- **la fondation**, il existe plusieurs types de fondation (voir figure I.4) parmi elle la fondation mono pieu, la fondation gravitaire et la fondation en métalliques ou «Jacket ».

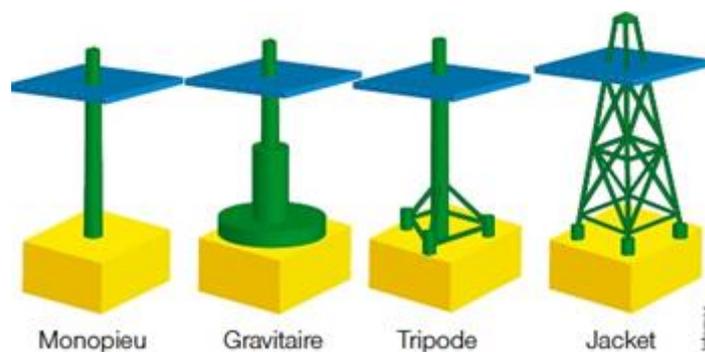


Figure I.4 : types de fondations structures

I.5. Principe de fonctionnement:

La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent (figure 5).

Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique (énergie que possède un corps du fait de son mouvement) du vent en énergie mécanique.

Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement.

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Ainsi, le multiplicateur a pour rôle d'accélérer le mouvement lent des pales.

Le transport de l'électricité produite via des câbles sous-marins jusqu'à terre.

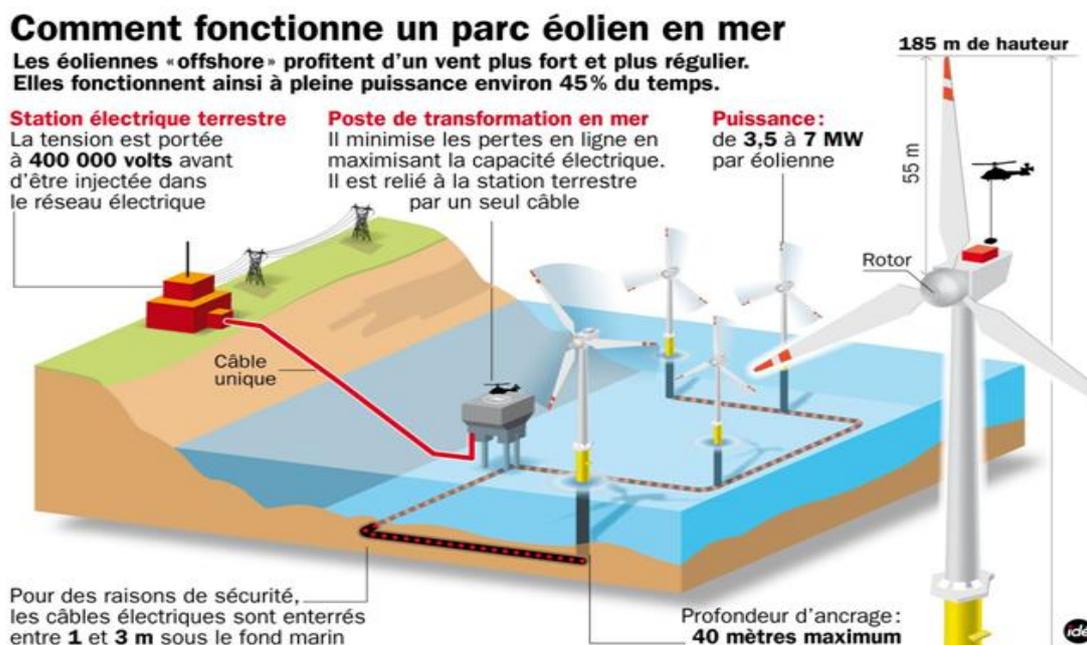


Figure I.5 : principe de fonctionnement

I.6. Modélisation de la chaîne de production :

I.6.1. Configuration de l'éolienne

La configuration des éoliennes détermine leur capacité de régulation en vitesse et en puissance. La nature de leur partie électrique et de leur connexion au réseau définit si l'éolienne est à vitesse fixe ou à vitesse variable.

➤ Éoliennes à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Selon la référence, une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe.

➤ Éoliennes à vitesse fixe

Une éolienne à vitesse fixe désigne le fait que le rotor de celle-ci possède toujours la même vitesse angulaire d'opération, peu importe la vitesse du vent. Cette vitesse de fonctionnement dépend du design de la turbine elle-même et de la fréquence du réseau électrique.

Depuis le début des années 1970, soit lors de l'arrivée de la machine asynchrone dans le domaine de l'éolien, la presque totalité des turbines éoliennes à vitesse fixe utilise la machine asynchrone à cage. Pour cette configuration, le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau via un transformateur. De plus, cette configuration couple le rotor de l'éolienne au rotor de la machine asynchrone via une boîte de vitesse. Cette dernière, jumelée à un nombre de paires de pôles de la génératrice électrique

Les éoliennes à vitesse fixe possèdent tout de même quelques avantages, soit la simplicité, l'utilisation d'une technologie peu coûteuse et le faible besoin de maintenance.

I.6.2. Quelques notions sur Le vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver

et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. **Direction et vitesse du vent** : Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au tableau 2.

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (dan/m ²)
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

Tableau I.2 : échelle Beaufort

I.6.3. Modélisation de vent :

La vitesse du vent est une grandeur aléatoire difficilement prévisible. Sa modélisation s'appuie sur des séries statistiques et des relations probabilistes. En général pour obtenir des données sur le potentiel éolien d'un site donné, on mesure la vitesse moyenne du vent par intervalles de temps réguliers (généralement toutes les 10 minutes). Les valeurs obtenues sont alors réparties en effectifs par classes de vitesse de vent au moyen d'un

histogramme. On exprime ainsi le potentiel énergétique d'un site en fonction de la fréquence des différentes classes de vitesse de vent.

La statistique de Wei bull permet une bonne approximation théorique des résultats de cette expérience par une loi de probabilité pouvant s'exprimer suivant (1), où v_v est la vitesse du vent et (c_v, k_v) un couple de paramètres déterminés par analyse de l'histogramme des classes de vent. Le facteur de forme k_v est supérieur à 3 si la forme de l'histogramme ressemble à celle d'une distribution normale, caractérisée par une répartition uniforme autour d'une valeur moyenne. c_v est un facteur d'échelle généralement supérieur à 5.

$$p(V_v, C_v, K_v) = \frac{K_v}{C_v^{K_v}} V_v^{K_v-1} e^{-\left(\frac{V_v}{C_v}\right)^{K_v}} \quad (1)$$

Pour générer une suite numérique respectant la distribution de Wei bull donnée en (1) on se sert de l'expression (2) où $\text{rand}(t)$ est une fonction génératrice de nombre aléatoires compris entre 0 et 1, suivant une distribution uniforme. En rajoutant la valeur moyenne V_v , de la vitesse du vent, et la moyenne ξ_v^0 , des perturbations, l'expression (3) permet de générer le profil du vent sur période de temps voulue

$$\xi_v(t) = \left(\frac{-\ln(\text{rand}(t))}{c_v} \right)^{\frac{1}{k_v}} \quad (2)$$

$$V_{v(t)} = 1 + \xi_v(t) - \xi_v^0 \quad (3)$$

Pour tenir compte du gradient de vitesse moyenne sur toute la surface du rotor de la turbine, la fonction génératrice de vitesses de vent est généralement filtrée. Ceci permet d'éliminer les composantes de très haute fréquence du profil de vent simulé. Ce filtre a pour fonction de transfert:

$$H_v(s) = \frac{1}{1+sT_v} \quad (4)$$

La Figure 6 montre le profil de vent généré sur 10 s, ainsi que l'allure de distribution statistique correspondante. Les paramètres employés sont des valeurs typiques communément admises dans la littérature. La distribution statique représentée en Figure 6(a) a été déterminée à partir de la statistique effectuée sur la courbe de la Figure 6(b).

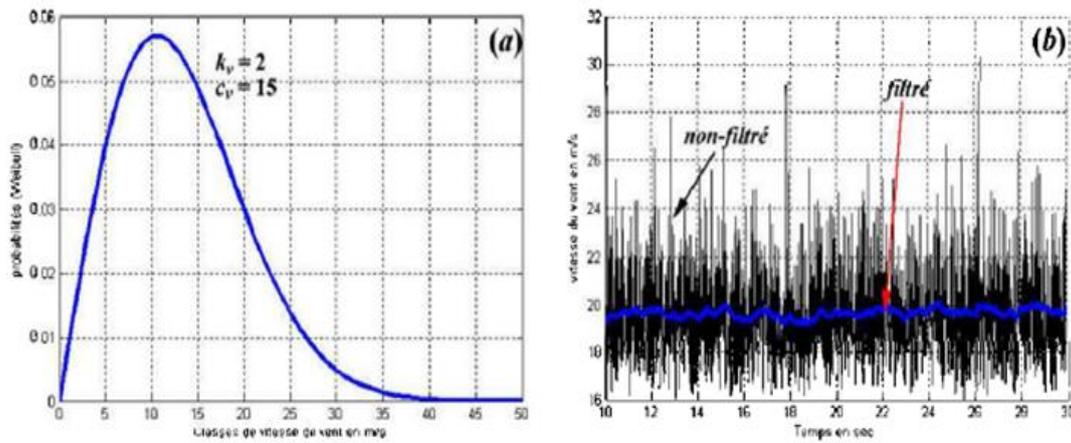


Figure I.6 : Simulation de la vitesse aléatoire de vent

(a) distribution de Weibull

(b) Signal généré (avant et après filtrage)

I.6.4. Modélisation de production de la puissance éolienne :

L'énergie cinétique d'une masse d'air m qui se déplace avec la vitesse V , est:

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (5)$$

L'énergie captée par l'éolienne :

$$\Delta w = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (6)$$

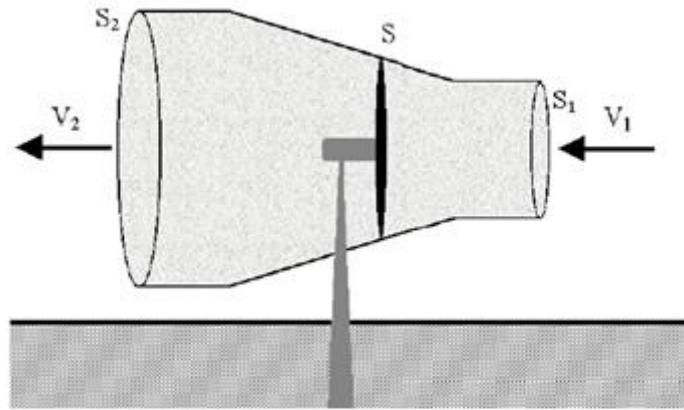


Figure I.7 : tube de courant autour d'une éolienne

La figure 7 montre les vitesses du vent V_1 est la vitesse amont et V_2 est la vitesse aval par rapport aux pales.

La vitesse des pales :

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

Le mouvement des pales est donnée par :

$$x = V \cdot t = \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot t \quad (8)$$

x : le mouvement des pales

V : la vitesse des pales

La masse de volume d'aire est donnée par :

$$m = Vol \cdot \rho_{air} \quad (9)$$

Vol : Le volume d'aire est égale a : $Vol = x \cdot s_R$

s_R : La surface balaie par les pales est égale a : $s_R = \pi \cdot r_p^2$ (r_p : le rayon des pales)

ρ_{air} : La densité d'aire

On remplace (8) dans (9) :

$$m = \rho_{air} \cdot \pi \cdot r_p^2 \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{2} \cdot t \quad (10)$$

On remplace (10) dans (6) :

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot \pi \cdot r_p^2 \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot t = P_{éol} \cdot t \quad (11)$$

Donc :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot \pi \cdot r_p^2 \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot t \quad (12)$$

La puissance max de l'éolienne est :

$$\frac{dP_{éol}}{dV_2} = 0 \quad (13)$$

La solution de l'équation (13) donne pour V_2 max : $V_2 = \frac{1}{3} V_1$

Donc :

$$P_{éol \max} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot \pi \cdot r_p^2 \cdot V_1^3 \cdot 0,59 \quad (14)$$

Dont 0,59 est le max de coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ donc :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot \pi \cdot r_p^2 \cdot V_1^3 \cdot C_p(\lambda) \quad (15)$$

Le coefficient de puissance dépendant de la construction mécanique du rotor. λ est la vitesse spécifique permettant une meilleure description mathématique de la conversion et W_{Rm} est la vitesse mécanique de l'arbre lent de la turbine :

$$\lambda = \frac{W_{Rm} \cdot r_p}{V_v} \quad (16)$$

La Figure 8 montre la courbe simulée de la puissance convertie, par application de la formule (15), pour plusieurs vitesses du vent ($\sim = 6, 7, \dots, 14$ m/s) en supposant que la vitesse de rotation de la turbine varie de 0 à 1,4 de la vitesse nominale.

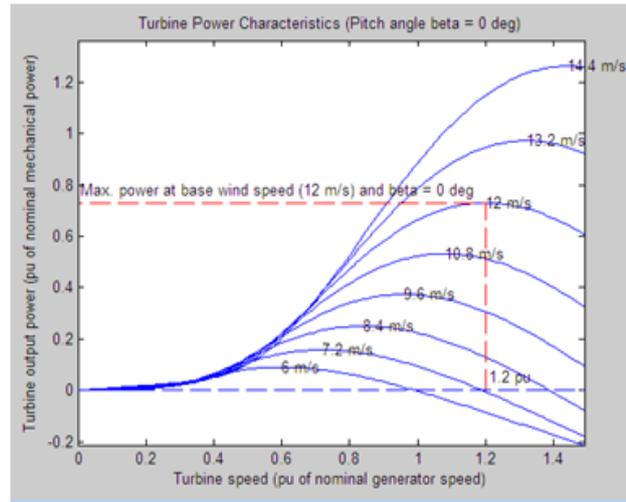
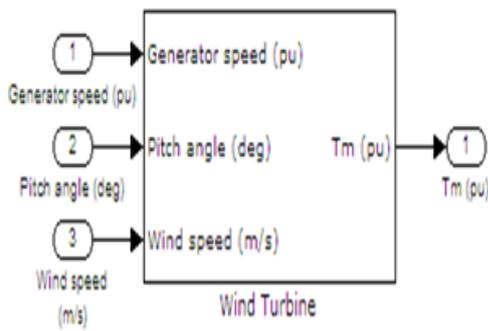


Figure I.8 : (a) Modèle de la turbine (b) vitesse de rotation en fonction de puissance convertie

I.6.5. La transmission mécanique :

Pour modéliser la transmission mécanique, on emploie généralement le modèle à deux masses tournante, reliées par un couplage flexible à travers un multiplicateur de vitesse (voir Figure 6). Les frictions côté rotor sont représentées par un coefficient de frottement rotorique DR et les frictions cotées générateur sont représentés par Dg . Ce système mécanique est soumis aux actions opposées du couple mécanique rotorique et du couple électromagnétique du générateur. Le multiplicateur de vitesse sert à adapter la vitesse lente du rotor à vitesse rapide nécessaire pour le bon fonctionnement du générateur. Au niveau du multiplicateur, on a :

$$W_{gm} = \eta \cdot n \cdot W_{Rm} \quad (rad/s) \tag{17}$$

$$P_{gm} = T_g \cdot W_{gm} = \eta \cdot T_R \cdot W_{Rm} = \eta \cdot P_{Rm} \quad (w) \tag{18}$$

$$T_R = \frac{n}{\eta} \cdot T_g \quad (N.m) \tag{19}$$

Où n : est le rapport de multiplicateur

η : est le rendement de multiplicateur en général est égal à 1

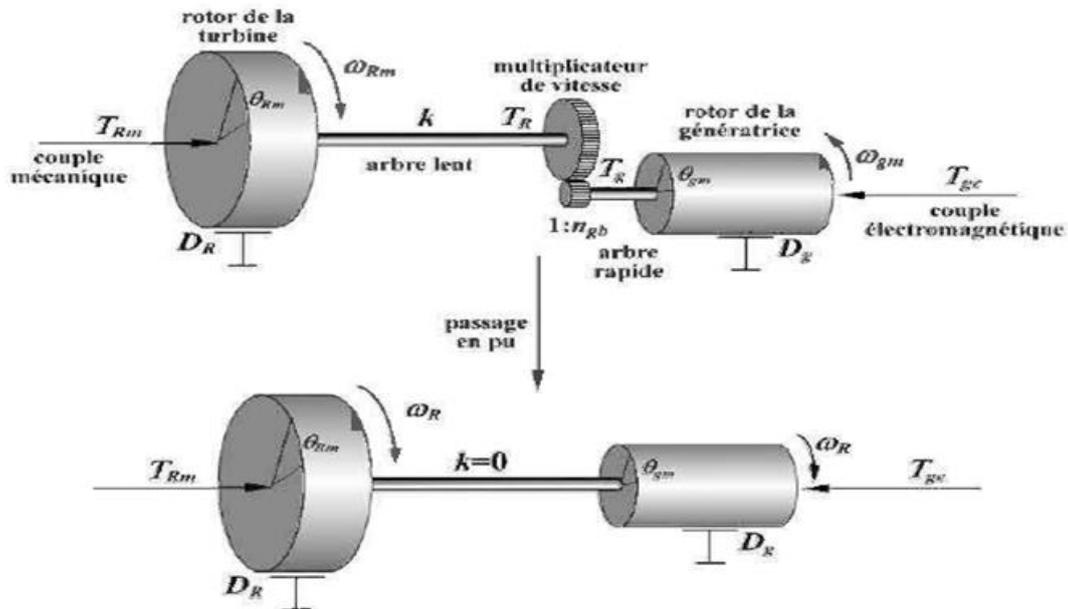


Figure I.9 : Modélisation de la transmission mécanique de l'éolienne

Si les deux arbres sont reportés à la même base de puissance, le multiplicateur de vitesse peut être supprimé du modèle. En effet, si l'on considère la puissance nominale de la génératrice S_N comme base de puissance, on a :

$$\left. \begin{aligned} P_{gref} &= S_N = P_{Rref} \\ W_{gmref} &= n \cdot W_{Rmref} \\ T_{Rref} &= n \cdot T_{gref} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

En réécrivant les expressions (17) et (19) en pu on obtient (21) et (22) qui correspondent à un couplage direct des deux arbres.

$$\frac{W_{gm}}{W_{gmref}} = \frac{n.W_{RM}}{n.W_{RMref}} \Rightarrow (W_{gm})_{PU} = (W_{RM})_{PU} \quad (21)$$

$$\frac{T_R}{T_{Rref}} = \frac{n.T_g}{n.T_{gref}} \Rightarrow (T_R)_{PU} = (T_g)_{PU} \quad (22)$$

I.6.6. Système de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

A- Système à décrochage aérodynamique "stall" :

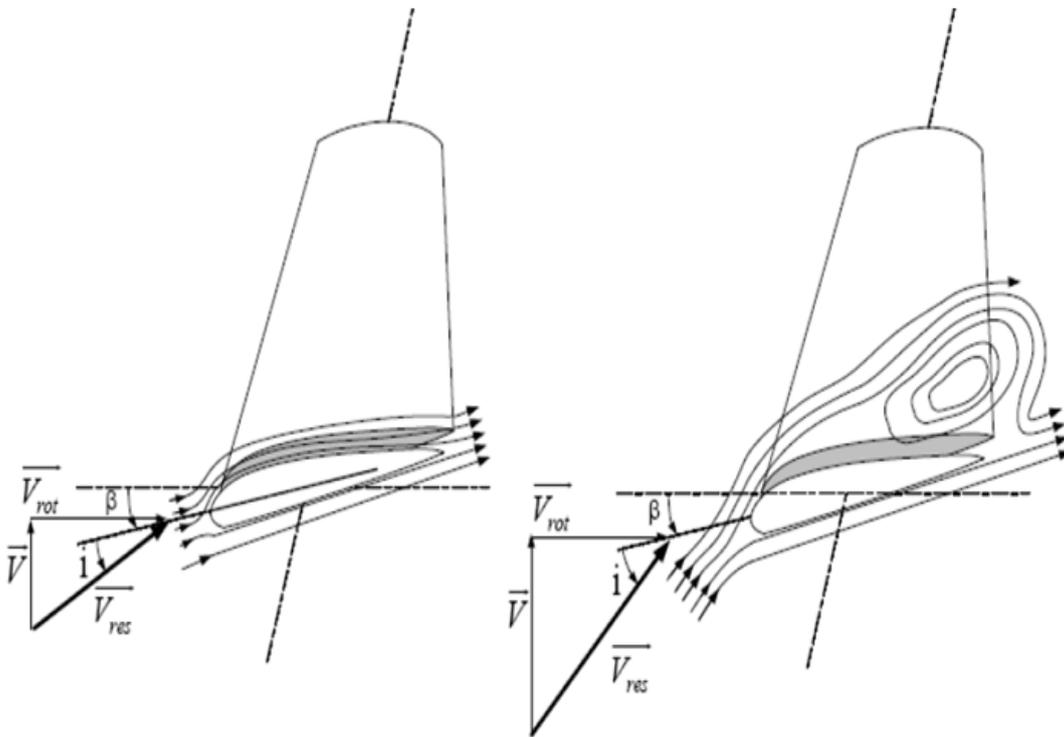


Figure I.10 : Flux d'air sur un des pales (stall)

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure 9) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation. Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de la vitesse du vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante.

B- Système d'orientation des pales "pitch" :

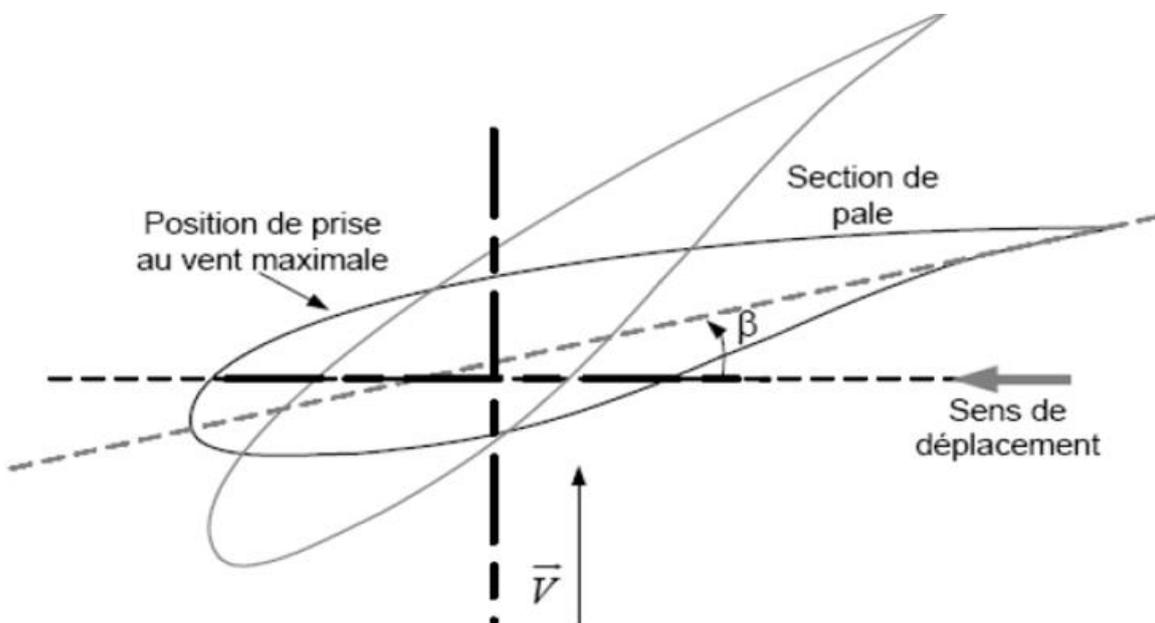


Figure I.11 : Variation de l'angle de calage d'une pale

Il utilise la variation de l'angle de calage des pales (figure 11). En variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de traînage. L'angle d'incidence optimal conduit à la puissance maximale disponible.

En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne permet quatre actions distinctes :

- 1- le démarrage à une vitesse du vent V_d plus faible ;
- 2- l'optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites $[V_d, V_n]$ en complément de la vitesse variable dans une plage relativement réduite ;
- 3- la régulation par limitation de la puissance pour $V > V_n$;
- 4- la protection de l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en « drapeau » des pales de l'hélice. On remarque que ce système intervient dans le fonctionnement de la turbine, par la variation du calage β , de manière prépondérante depuis le démarrage (figure 12), (Zone I) et dans le régime de régulation de vitesse (zone II et III) jusqu'au phénomène de décrochage aérodynamique (zone IV) de la turbine.

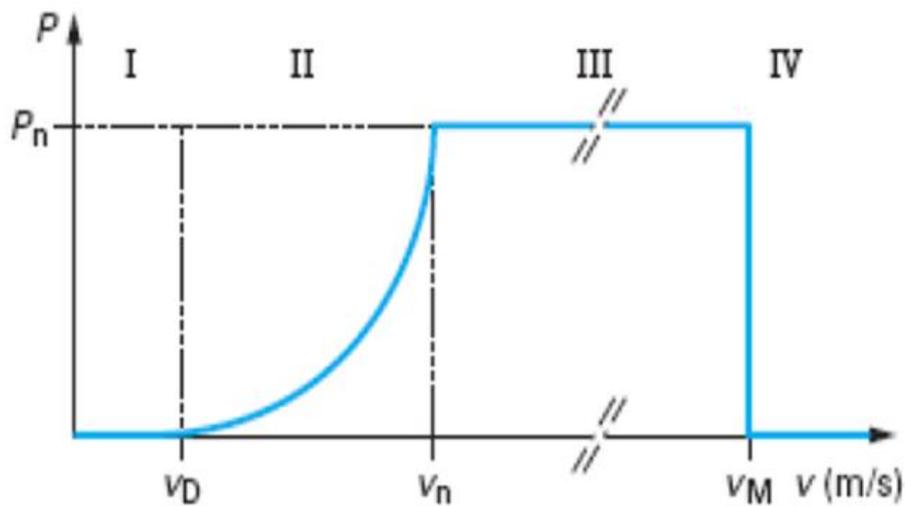


Figure I.12 : Courbe typique de régulation

Diagnostic :

La puissance donnée par l'éolienne avec la vitesse du vent de la zone de la mer Méditerranée qui variée entre 5 à 10m/s (Figure 15) est 23 KW.

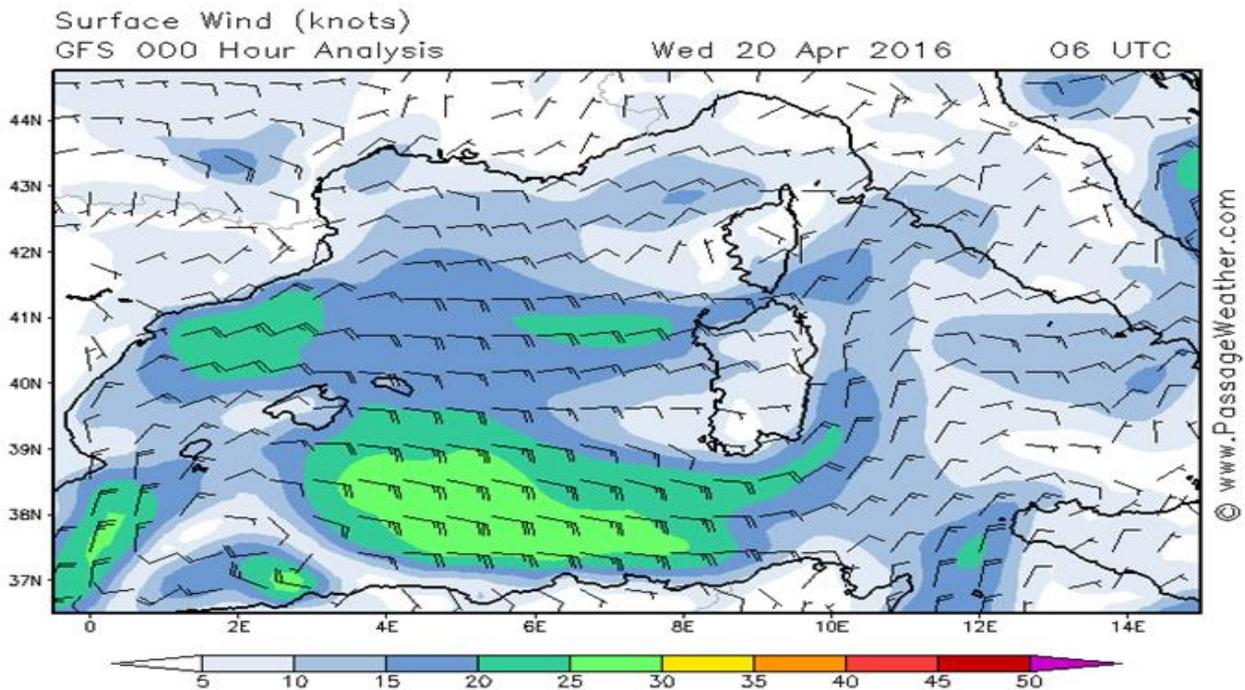


Figure I.15 : représente la vitesse du vent dans la zone de la mer Méditerranée

I.8. Résumé :

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation. Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants.

Chapitre II

Généralité sur le système hydrolienne

II.1. Introduction :

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, hydro-cinétiques (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 (IEEE, 2005). Cependant, l'énergie hydro-cinétique des courants de marée, que l'on peut 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 hydroliennes se développent ainsi plus rapidement car on peut désormais s'appuyer sur des techniques fiables et éprouvées. De plus, le potentiel énergétique mondial de cette énergie est estimé à une puissance de 100 GW, ce qui représente un gisement énergétique non négligeable et très prometteur.

II.2. Définition de l'énergie hydrolienne :

Les hydroliennes permettent de transformer l'énergie cinétique des courants marins en électricité. Les mouvements de la mer sont une source inépuisable d'énergie. Il existe trois formes principales de captation de cette énergie :

- Transformation de l'énergie cinétique des courants marins, notamment des courants de marée que l'on rencontre près des côtes, dans le cas des hydroliennes ici traité ;

- Utilisation de l'énergie potentielle liée au marnage (différence de niveau entre la pleine et la basse mer) par des usines marémotrices du type de celle de la Rance ;
- Emploi de l'énergie des vagues nées du vent à la surface des mers, par différents dispositifs comme des bouées ou des colonnes oscillantes qui captent l'énergie par pompage puis turbinage ou des rampes associées à un puits de turbinage.

Les hydroliennes sont des sortes d'éoliennes subaquatiques. Le déplacement de l'eau par les courants marins fait tourner leurs pales. L'énergie mécanique générée est convertie en électricité par dynamo.

II.3. les différents types d'hydrolienne :

➤ Hydrolienne à axe horizontal :

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

➤ L'Hydrolienne Hydro-gen :

Celle ci se situe a la surface de l'eau, elle ressemble a un moulin a vent, elle est basée sur un concept exclusif de grosses roues à aubes flottantes, insérées dans un catamaran tuyère et amarrées par des lignes de mouillages sur le fond de la mer.

➤ Les Hydroliennes de type « chaîne » :

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

II.4. les différentes parties d'une hydrolienne :

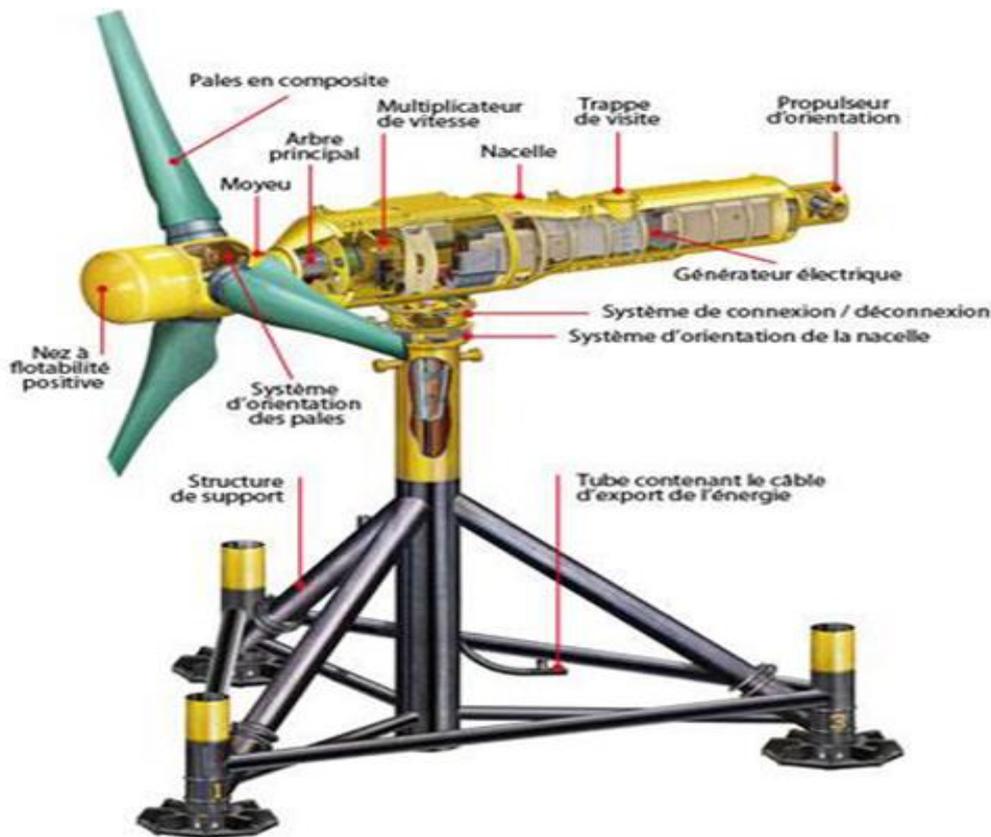


Figure II.16 : Les différentes parties d'une hydrolienne

La plupart des hydroliennes sont constituées de :

- a- Une turbine (c'est une roue qui transforme l'énergie d'un fluide, eau ou gaz, en un mouvement de rotation). Turbine d'hydrolienne.
- b- Un générateur produisant de l'électricité.
- c- Un mât ou une ancre (permettant la fixation de l'hydrolienne).

II.5. Principe de fonctionnement:

Le principe de fonctionnement d'une hydrolienne est simple: on place des hélices ou des turbines dans l'axe des courants des marées pour capter l'énergie que ces dernières peuvent fournir.

Le courant va faire tourner l'hélice de l'hydrolienne qui va transformer l'énergie mécanique en énergie électrique grâce à un alternateur. Cette électricité est ensuite acheminée par des câbles reliés au rivage jusqu'à différents points de distribution

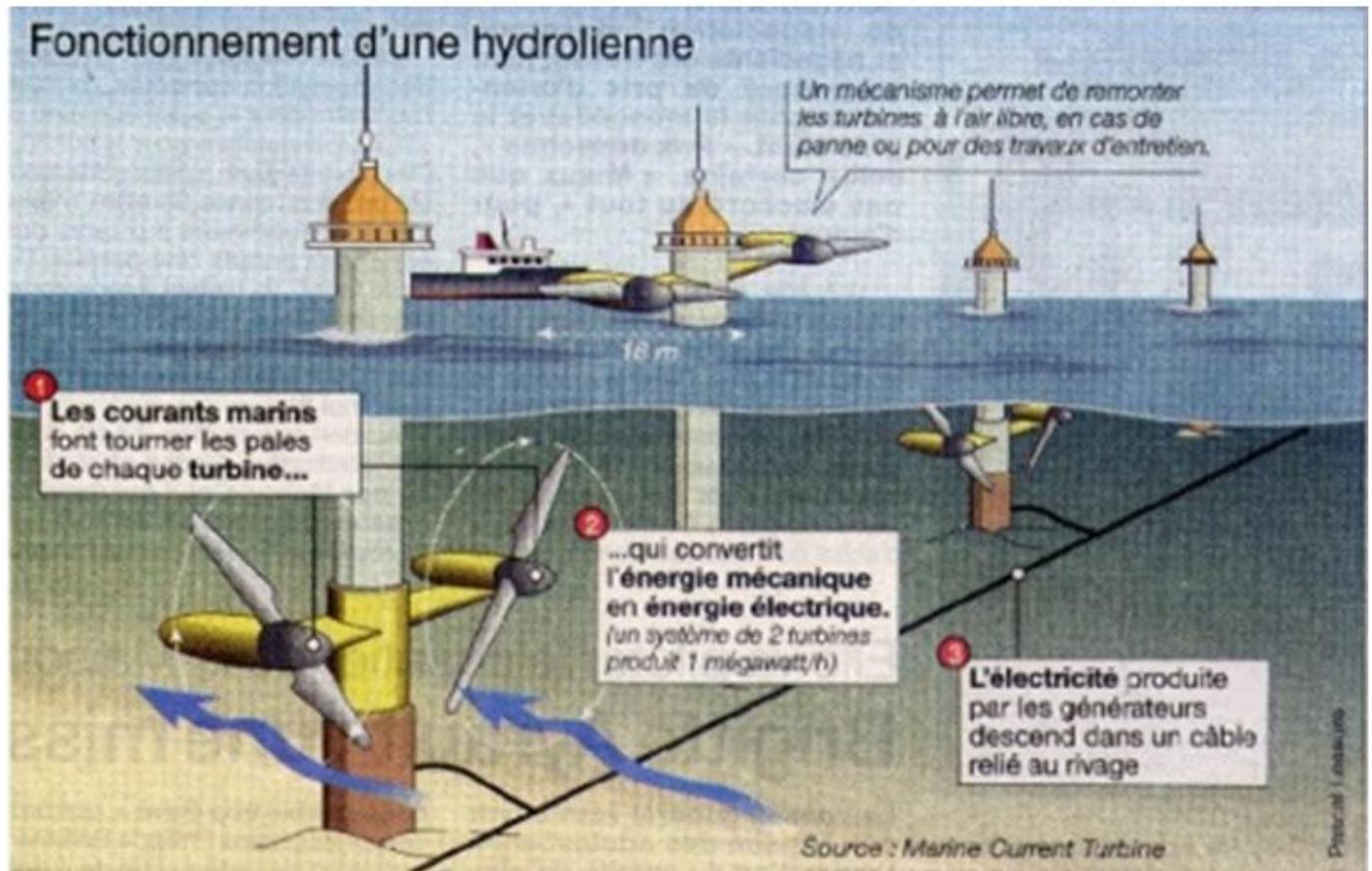


Figure II.17 : principe de fonctionnement

II.6. Les courants des marées :

On peut en distinguer deux types: les courants de surface et les courants de profondeur. Ils sont déterminés par des différences de température. La différence de densité entre les eaux plus ou moins chaudes (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. Comme deux catégories de courants, on distingue les courants marins (situés en plein mer) et les courants de marées (situés, au contraire, près des côtes et à l'embouchure des fleuves). Ce sont des différences qui vont déterminer l'emplacement des hydroliennes.

Les types de courant :

a- Les courants de surface :

- À une profondeur moyenne de 200m Causé par :

L'action du vent, la rotation de la Terre et la forme des continents

b- Les courants profonds :

- À une profondeur de plus de 200m Causé par :

La différence de température et de salinité entre les couches de profondeur

II.7. Modélisation de la chaine de production :

II.7.1. Modélisation des courants marins :

Pour expliquer l'origine des déplacements de masses d'eau on réalise l'expérience suivant :

Matériel : béciers, eau chaude, eau froide, glaçons, colorants rouge et bleu à diluer dans l'eau, agitateurs, colonnes en communication, thermomètres. (Figure 18).

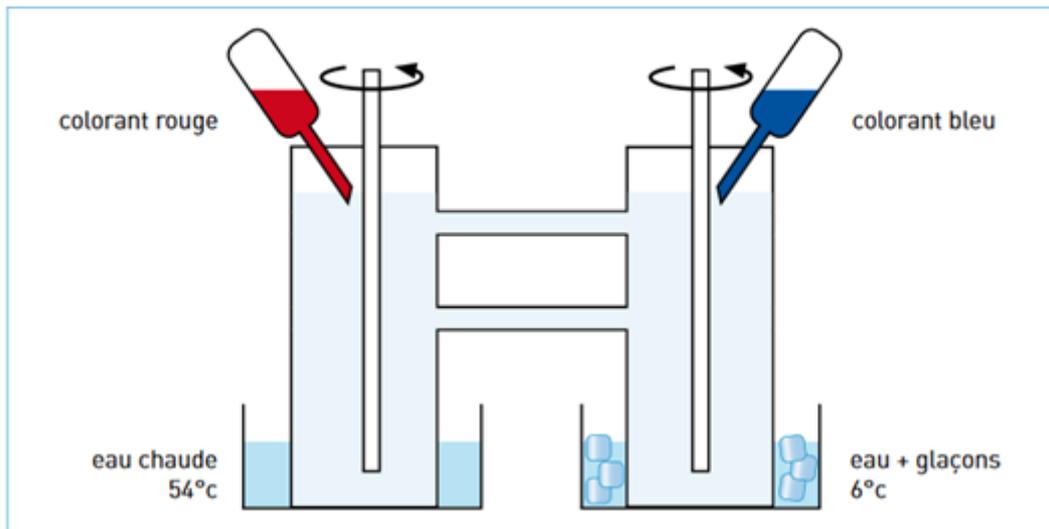


Figure II.18 : Modèle expérimental

L'eau chaude est colorée avec le rouge et l'eau froide avec le bleu, le résultat de cette expérience est dans la figure 19 :

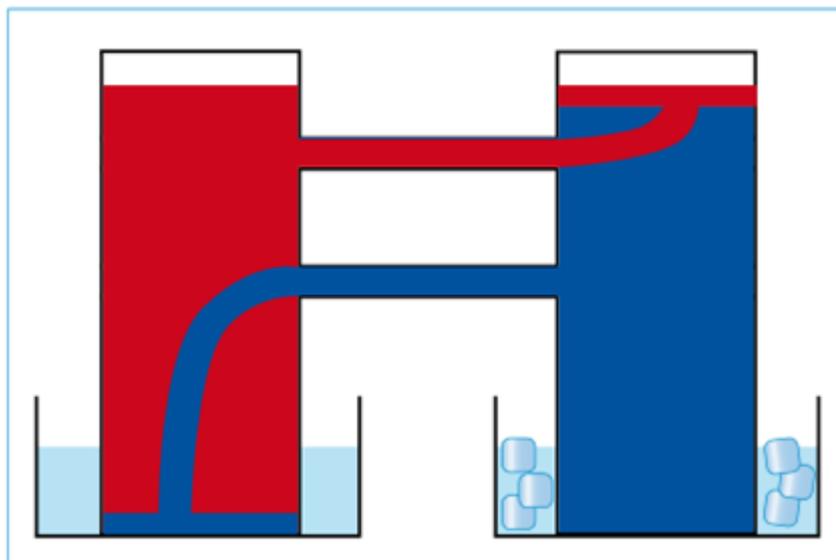


Figure II. 19 : Résultat de l'expérience

Les courants d'eau chaude sont en surface et les courants d'eau froide sont en profondeur. La température est donc un paramètre qui est à l'origine des déplacements de masses d'eau et donc des courants marins.

La figure 20 représente le déplacement de l'eau marine dans les océans

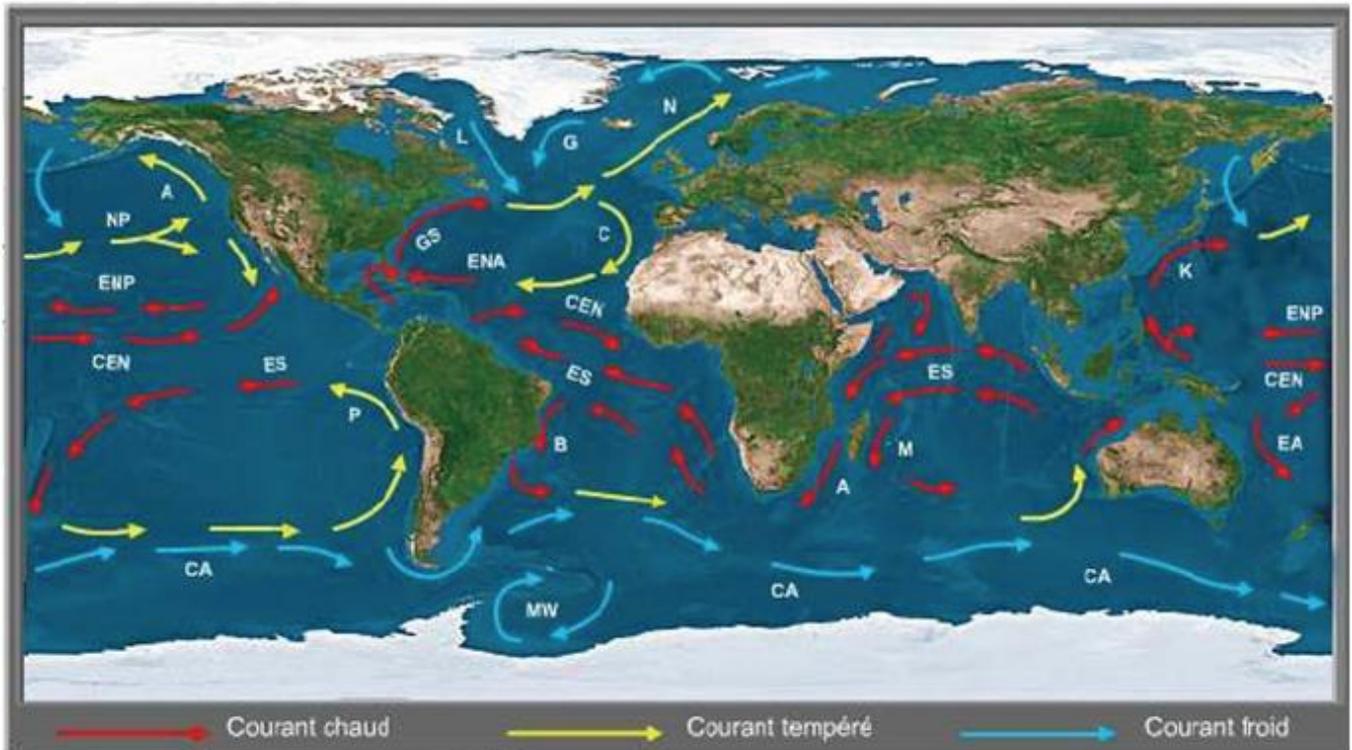


Figure II.20 : Les courants marins

- Il existe aussi autre caractère à un effet sur les courants marins :
 - Le vent : L'énergie Du vent est transférée à l'eau de la surface des océans. Ce Transfert cause un mouvement en forme La direction et la de courant vitesse des courants de surface sont directement liées aux vents.
 - La rotation de la terre : La rotation de la Terre Sur son axe influe sur les vents et les courants marins

II.7.2. Modélisation de la production de l'hydrolienne :

Le schéma global de la modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie hydro-cinétique connectée au réseau électrique est décrit par la figure 21.

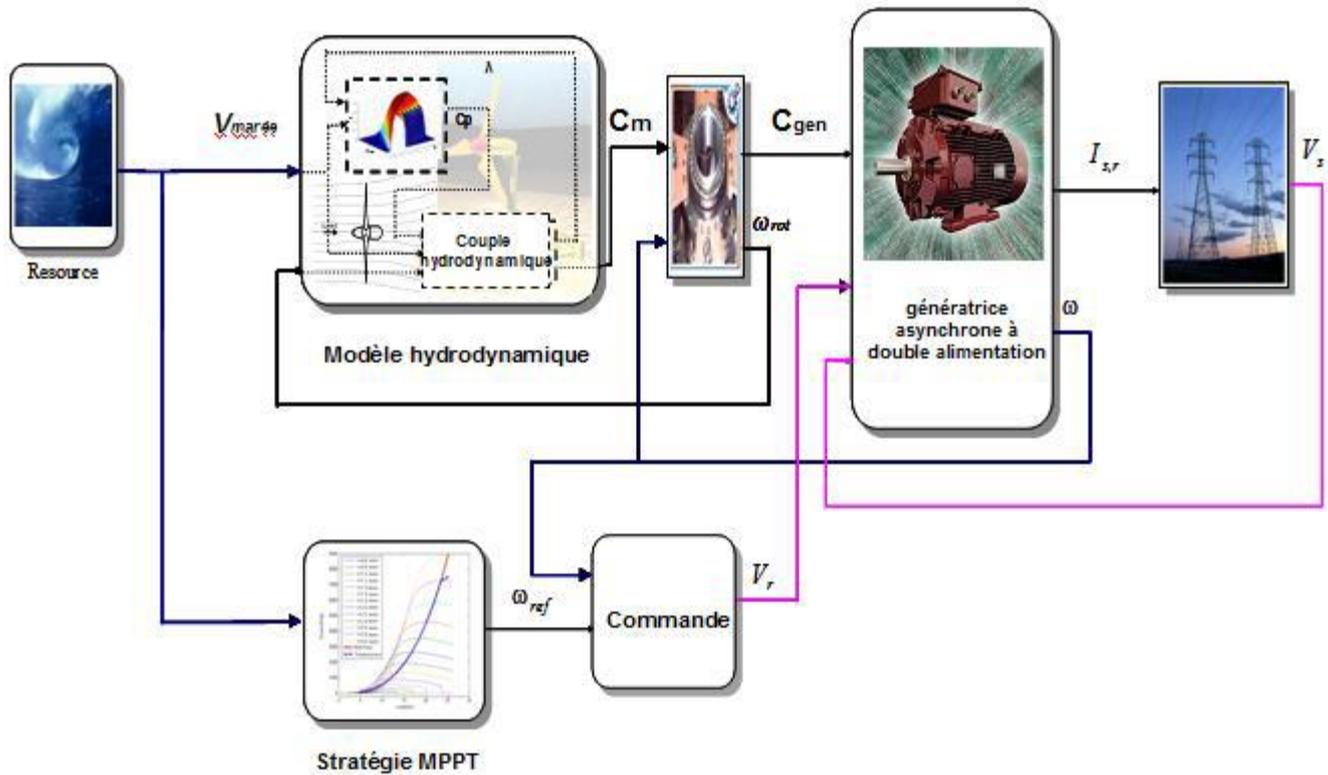


Figure II.21 : Schéma global d'une chaîne de conversion hydro-cinétique utilisant une hydrolienne

La puissance cinétique totale disponible sur la turbine d'une l'hydrolienne est donnée par :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{maré}^3 \quad (23)$$

Cependant, seule une partie de l'énergie disponible peut être captée par l'hydrolienne :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot V_{maré}^3 \quad (24)$$

Il est à noter que les expressions [23] et [24] sont valables pour tout système qui extrait l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement (éoliennes et hydroliennes). Pour les hydroliennes, le coefficient d'extraction d'énergie C_p qui dépend à la fois de la vitesse du fluide et de la vitesse de rotation de la turbine est généralement défini dans l'intervalle 0,35-0,5.

II.7.3. Modélisation hydrodynamique de la turbine :

Afin d'être capable d'évaluer la quantité d'énergie extraite en fonction du régime de fonctionnement et de déterminer les lois de commande les plus favorables, il est nécessaire de disposer d'un modèle de performance du capteur d'énergie mécanique (turbine). En effet, ce modèle permet d'identifier la vitesse de rotation idéale de la turbine pour capter le maximum d'énergie. Notre travail sur ce sujet s'est focalisé sur le cas d'un capteur de type hélice ; type le plus utilisé dans les technologies recensées.

La modélisation du capteur que nous avons intégrée est basée sur la théorie des quantités de mouvement développée par Glauert. Cette théorie est une extension de la théorie de Rankine-Froude. Elle repose sur le découpage selon le rayon de chaque pale en petits secteurs de dimension au rayon dr (figure 22) et sur le calcul itératif de leurs performances en termes de portance et traînée à partir des données hydrodynamiques d'un profil.

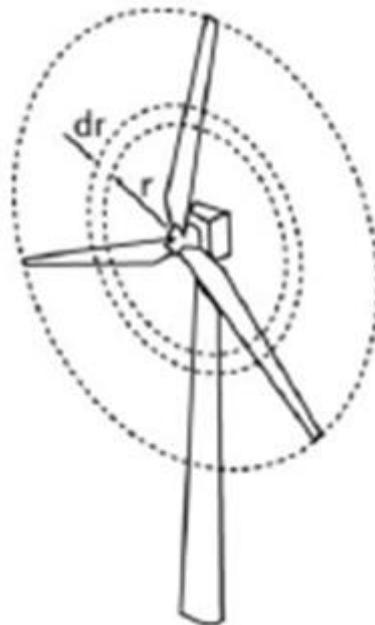


Figure II. 22: Découpage de la pale en secteurs élémentaires

Il est alors possible en utilisant cette méthode de déterminer les coefficients d'extraction de puissance en fonction du régime et de la géométrie de l'hélice. Cette méthodologie est décrite plus en détails chez. Ce modèle a été validé en comparant les résultats de simulations avec les données expérimentales existant dans la littérature.

Afin d'illustrer nos propos nous avons choisi de simuler une hélice à 3 pales utilisant un profil NACA44 (figure 23a). Le profil des pales choisi doit en effet répondre à des contraintes de résistance mécanique avec des épaisseurs plus fortes que celles employées pour les éoliennes et des distributions de pression n'entraînant pas de phénomènes de cavitation préjudiciables. Ce profil offre un bon coefficient de portance pour différentes incidences ainsi qu'une faible traînée, ce qui autorise une large gamme de fonctionnement.

Le préprocesseur d'un code de calcul, développé par l'Institut de recherche de l'Ecole navale, dit Singularités, est utilisé pour visualiser l'allure du profil choisi (figure 23b). Ce code permet d'obtenir un maillage précis du capteur à partir de lois géométriques.

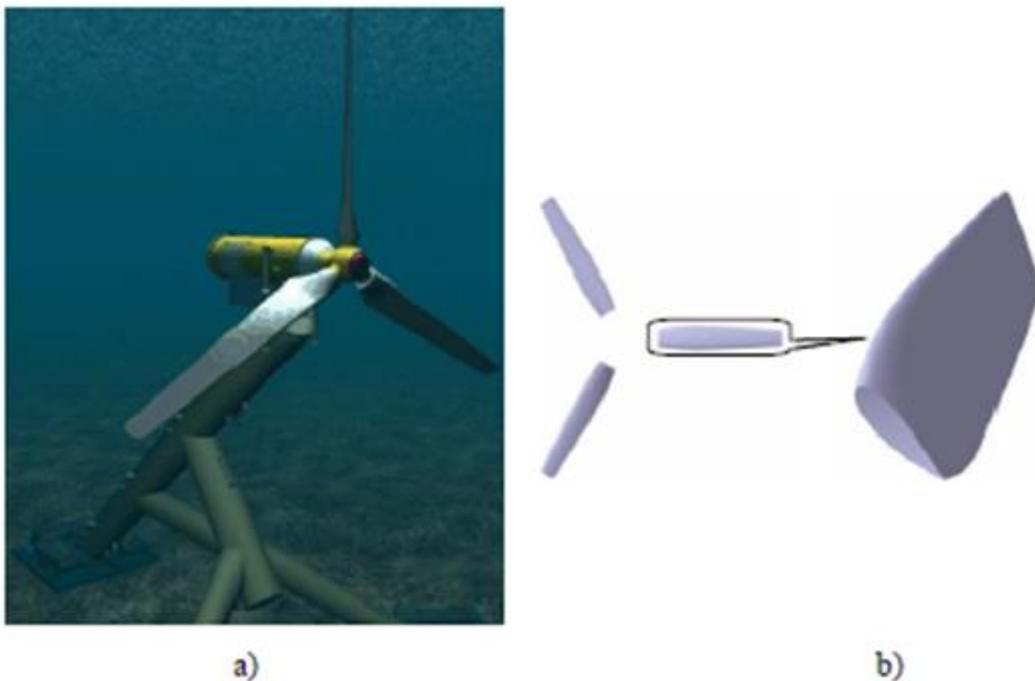


Figure II.23 : a) exemple d'hydrolienne tripale; b) maillage des pales

L'algorithme ainsi défini permet de calculer les coefficients de puissance qui seront utilisés par la suite dans le bloc hydrodynamique de la turbine sous Matlab/Simulink®. Ces coefficients, illustrés par la (figure 24a) pour une hélice tripale de 1,44 m de diamètre, dépendent de la vitesse tangentielle λ de la turbine et de la vitesse des courants marins $V_{marée}$. A partir de ces coefficients, une puissance utile peut être déduite (figure 24b).

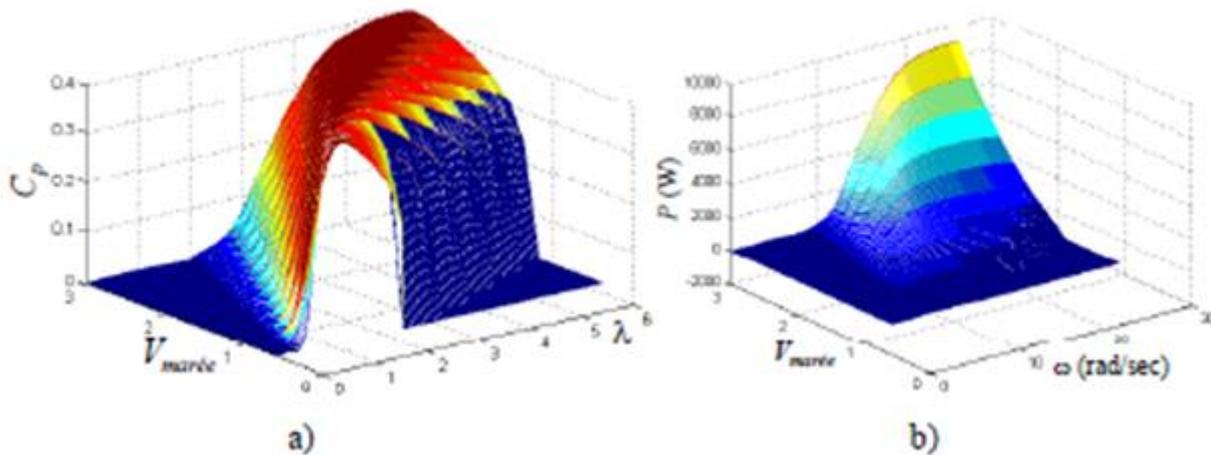


Figure II.24 : a) coefficient de puissance $C_p(\lambda, V_{marée})$; b) puissance utile $P(\omega, V_{marée})$ pour une hélice tripale de 1,44 m de diamètre.

II.8. Modèle hydrolienne en Matlab/Simulink:

Simulation :

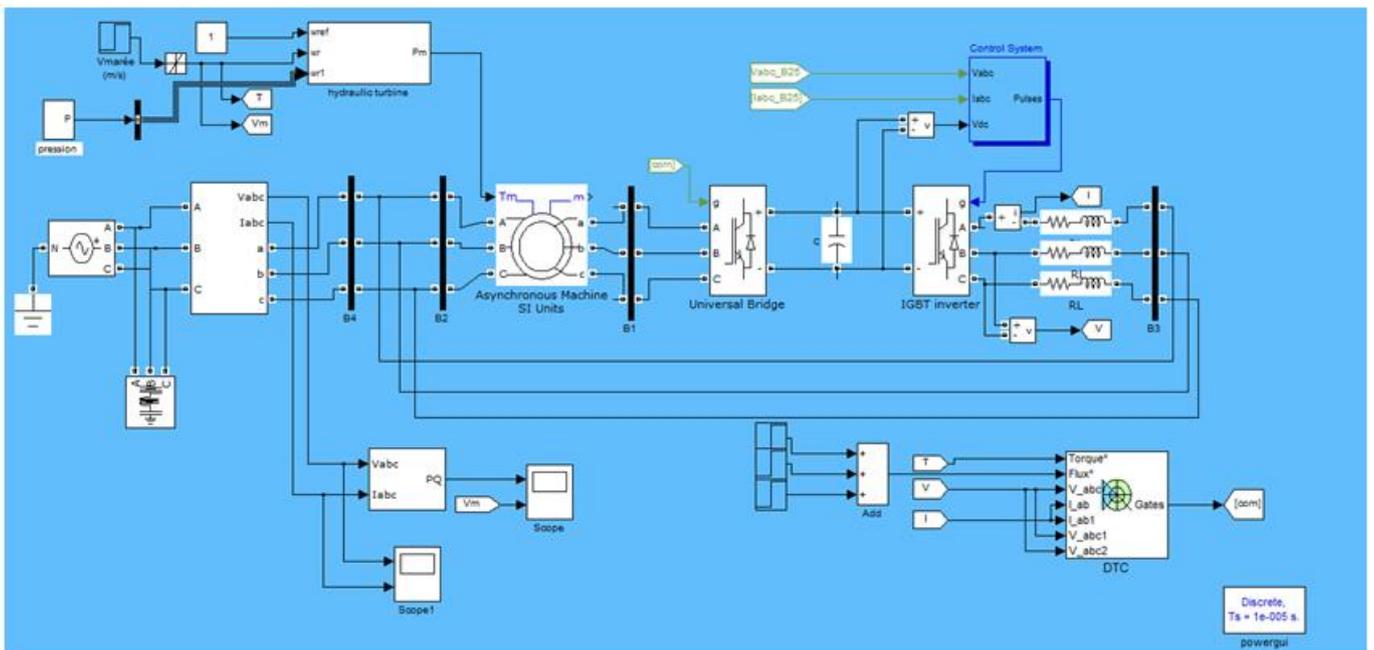


Figure II.25 : le modèle de la hydrolienne sous Matlab

II.8.1. Résultat de simulation

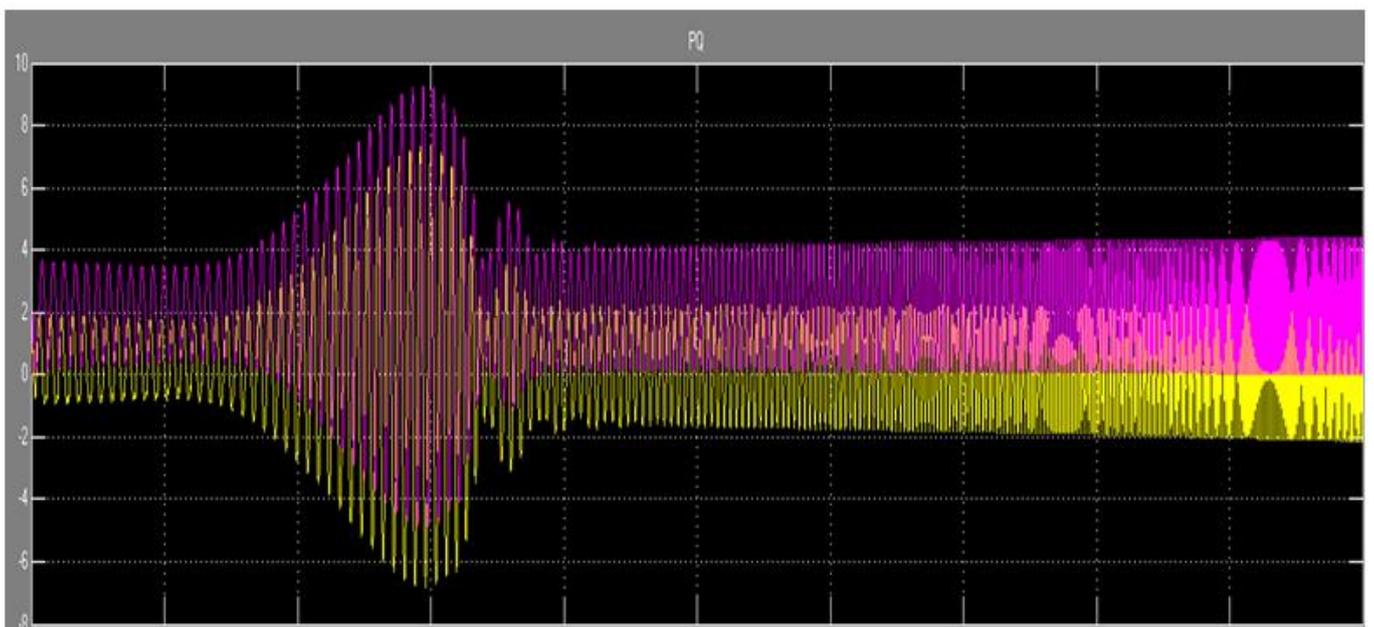


Figure II.26 : les résultats de la simulation

Diagnostic :

La puissance donnée par hydrolienne avec la vitesse de la mer Méditerranée qui égale à 1 m/s (Figure 27) est 4.37 KW.

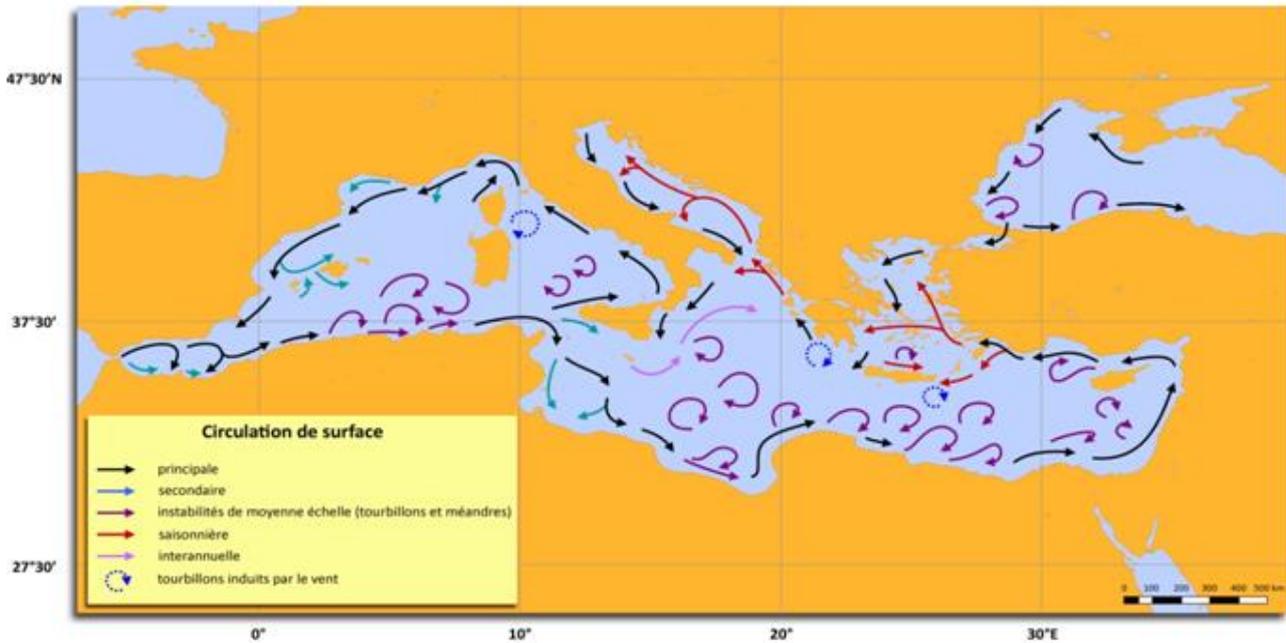


Figure II.27 : représente les courants d’eaux dans la mer Méditerranée

II.9. Résumé :

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d’ensemble des différentes turbines hydrolienne utilisées pour la production d’énergie électrique. Afin d’arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines, partant de la conversion de l’énergie cinétique de l’eau en énergie mécanique par la turbine, nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que la modélisation des courants marins où nous avons montré que l’origine des courants marins c’est la température. Enfin nous avons établi un modèle de simulation de la turbine sous l’environnement Matlab/Simulink.

Chapitre III

Modélisation de la machine à double alimentation (MADA)

III.1. Introduction :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice.

III.2. Topologie et emploi des machines asynchrones à double alimentation :

III.2.1. Structure des machines asynchrones à double alimentation :

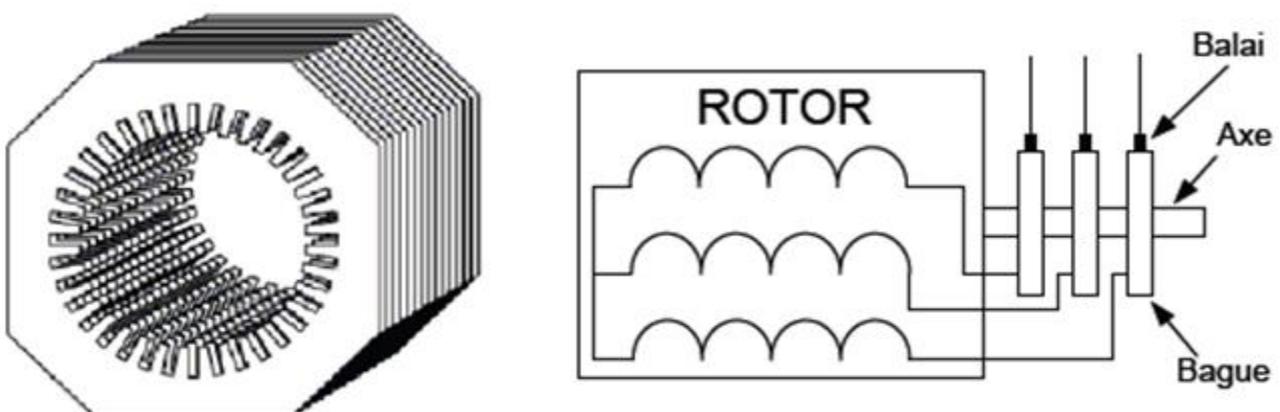


Figure III.28 : Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure 28).

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné à été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hypo synchrone (Figure 29).

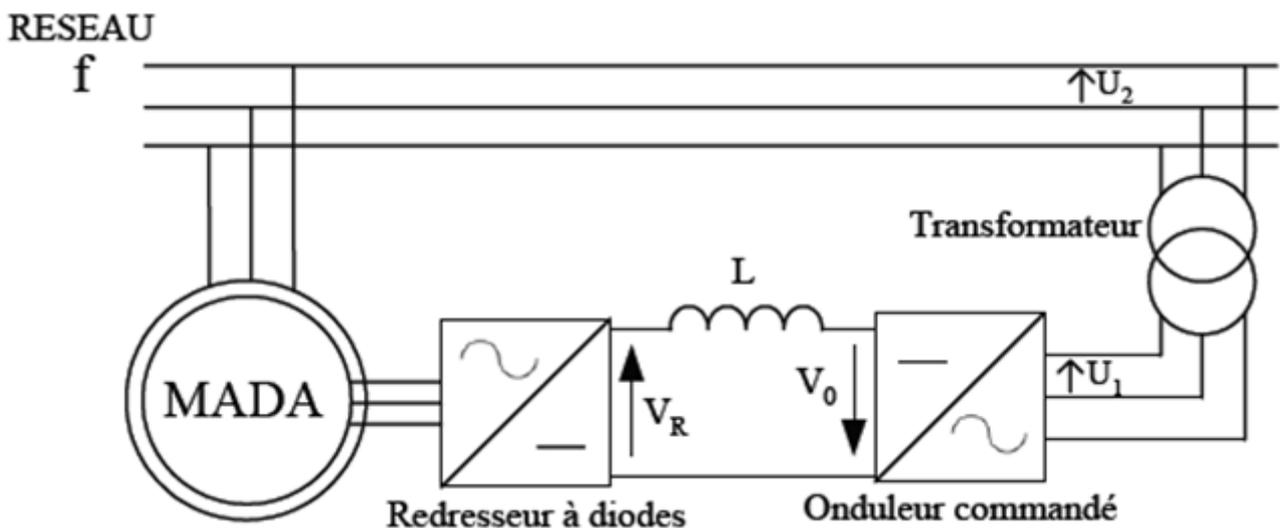


Figure III.29 : cascade hypo synchrone

Nous verrons comment nous pouvons utiliser la "réversibilité" de ce principe afin de faire fonctionner la MADA en génératrice à vitesse variable.

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative". La Figure 30 représente les différents enroulements et les flux présents à l'intérieur des structures d'une machine synchrone et d'une MADA.

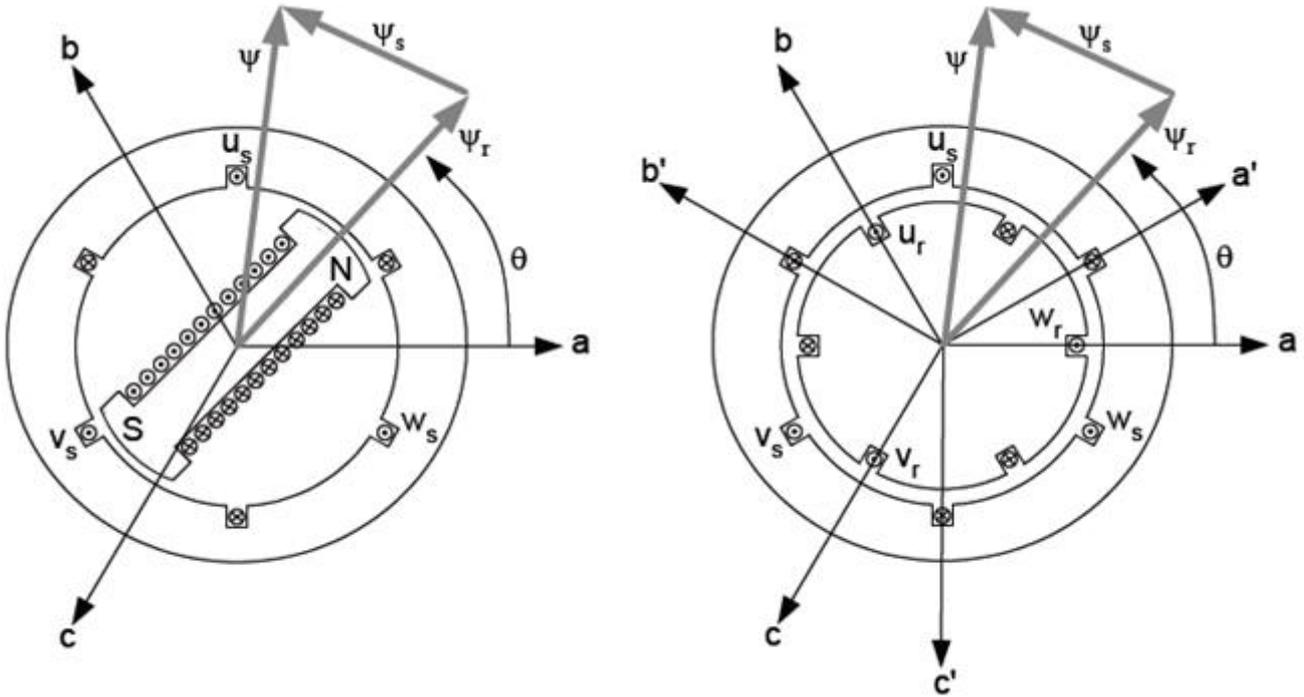


Figure III.30 : Configuration des enroulements et des flux dans une machine synchrone et dans une MADA

Le vecteur flux Ψ présent dans l'entrefer de la machine est la résultante du flux créé par les bobinages statorique Ψ_s et du flux rotorique Ψ_r créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu soit par l'alimentation alternative des bobinages rotorique triphasés. La principale divergence entre les deux machines est due à l'établissement du flux rotorique. En effet, dans une machine synchrone classique, la phase du flux rotorique dépend directement de la position mécanique de la roue polaire. Son évolution est donc dépendante de la machine elle-même et de la charge qui lui est accouplée et dépendra donc de la constante de temps mécanique globale du système. En l'absence d'autopilotage, les performances sont par conséquent limitées et des instabilités de fonctionnement peuvent apparaître.

En remplaçant la roue polaire par un circuit triphasé alimenté en alternatif, l'amplitude et la phase du vecteur Ψ_r sont totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux devient indépendante du système mécanique et dépend uniquement de la constante de temps électrique du système.

III.2.2. Application des machines asynchrones à double alimentation :

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statorique. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée :

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

Une troisième application de la MADA consiste à faire fonctionner celle-ci en moteur à vitesse variable à hautes performances avec deux convertisseurs : un au rotor et un au stator (Figure31)

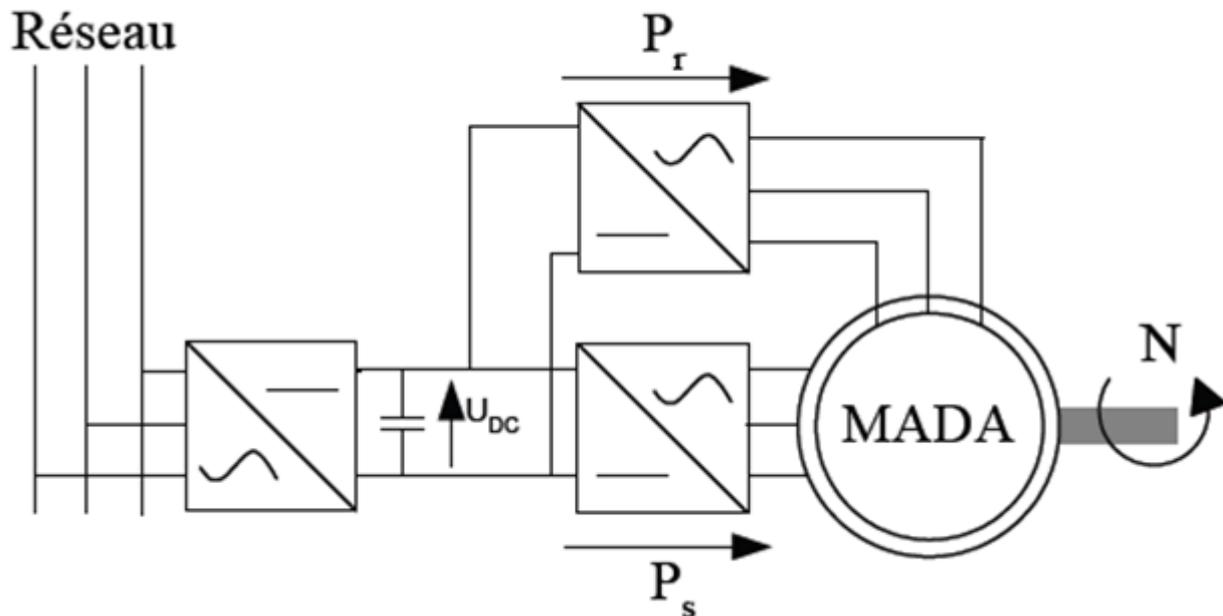


Figure III.31 : MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances

Ce dispositif permet de faire varier la vitesse de rotation depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse nominale à couple constant et depuis la vitesse nominale jusqu'à six fois celle-ci à puissance constante. Ce mode de fonctionnement présente de nombreux avantages :

- La commande vectorielle permet une bonne maîtrise du flux et du couple sur toute la plage de variation et confère une dynamique particulièrement élevée.
- Le système se prête très bien aux applications nécessitant d'excellentes propriétés de freinage puisqu'il suffit d'inverser le sens du champ tournant au rotor.
- Les fréquences d'alimentation sont partagées entre les stators et le rotor, limitant ainsi la fréquence maximale de sortie requise par chaque convertisseur et les pertes fer de la machine.
- Les puissances traversant les convertisseurs sont également partagées entre stator et rotor évitant ainsi le surdimensionnement de ces convertisseurs.

III.3. Fonctionnement en génératrice à vitesse variable :

La Figure 32 montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure Scherbius PWM). P_{RES} Est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_S , la puissance transitant par le stator, P_R , la puissance transitant par le rotor, et P_{MEC} , la puissance mécanique.

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hyposynchrone. En mode moteur hypersynchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hyposynchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hypersynchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_{MEC}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au-delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

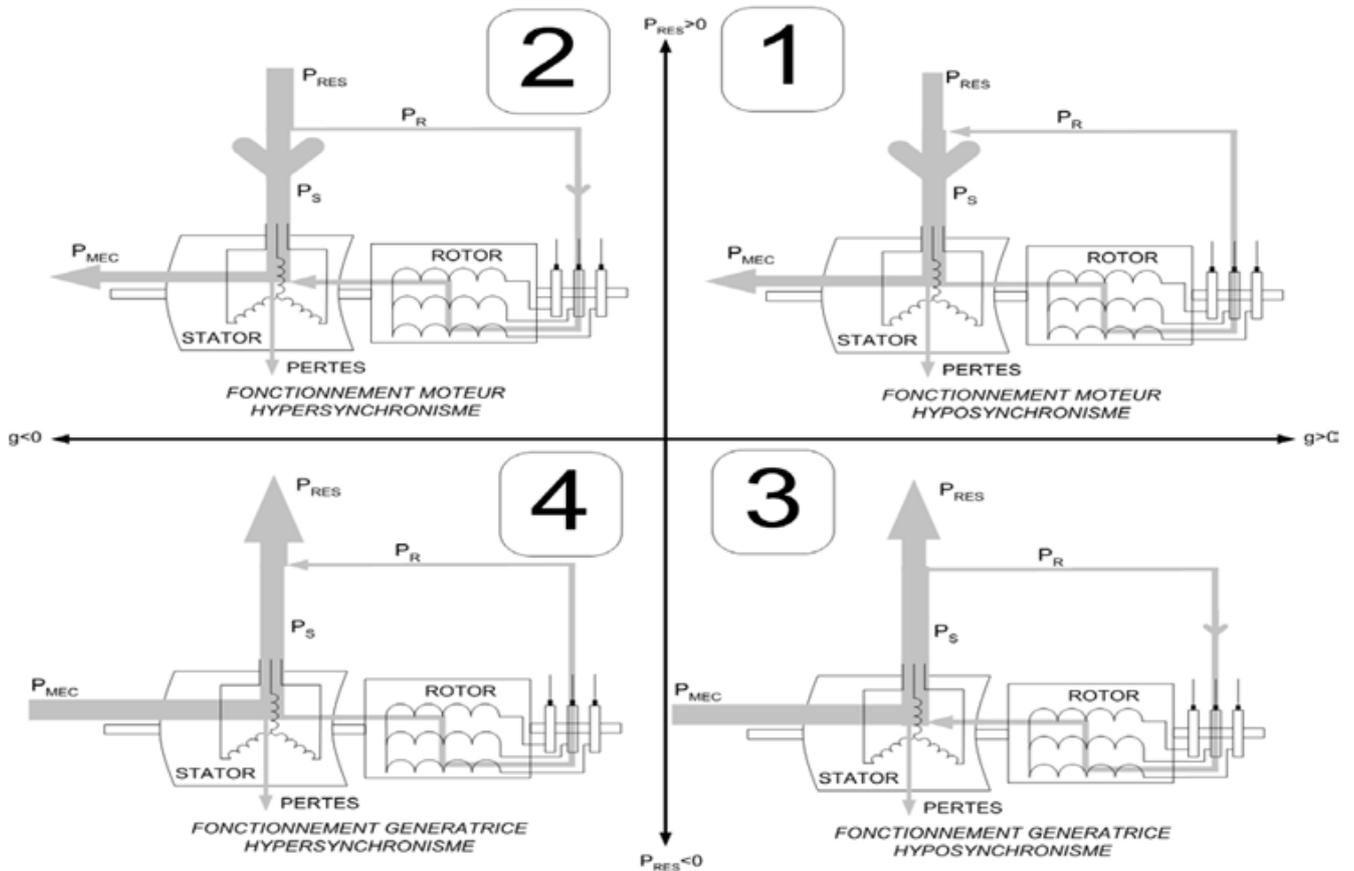


Figure III.32 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

A titre de comparaison, la Figure 33 montre la caractéristique de production optimale pour les deux types de machines (cage d'écureuil avec convertisseur et MADA) dans un système éolien. Nous constatons que si la machine à cage est capable de produire de l'énergie pour les très faibles vitesses de vent, cette énergie est écrêtée à la puissance nominale lorsque la machine atteint une vitesse très légèrement supérieure au synchronisme. La MADA ne commence à produire qu'à partir de 1000 tr/min (ce qui correspond à la vitesse de synchronisme moins 30%) de façon à ne pas augmenter la taille du convertisseur rotorique.

La puissance totale produite par la MADA est la somme des puissances statoriques et rotoriques.

Or, jusqu'au synchronisme, la puissance rotorique est négative, la MADA produit donc légèrement moins que la machine à cage. En revanche, au-delà du synchronisme, la

Figure 33 montre que la MADA est capable de produire de l'énergie par l'intermédiaire du rotor jusqu'à 1900 tr/min (vitesse de synchronisme + 30%).

Dans notre application, nous nous intéresserons au fonctionnement du quadrant n°3 (fonctionnement génératrice hyposynchrone), de façon à ne traiter le transfert de puissance rotorique dans une seule direction (réseau vers rotor). Le convertisseur côté réseau sera donc un simple redresseur unidirectionnel. La tension du bus continu est par conséquent fixée et nous nous intéressons uniquement au contrôle du convertisseur côté rotorique. L'étude de la bidirectionnalité du transfert de puissance entre le rotor et le réseau et la commande du convertisseur coté réseau feront l'objet d'une seconde étape dans l'étude de la MADA en génératrice.

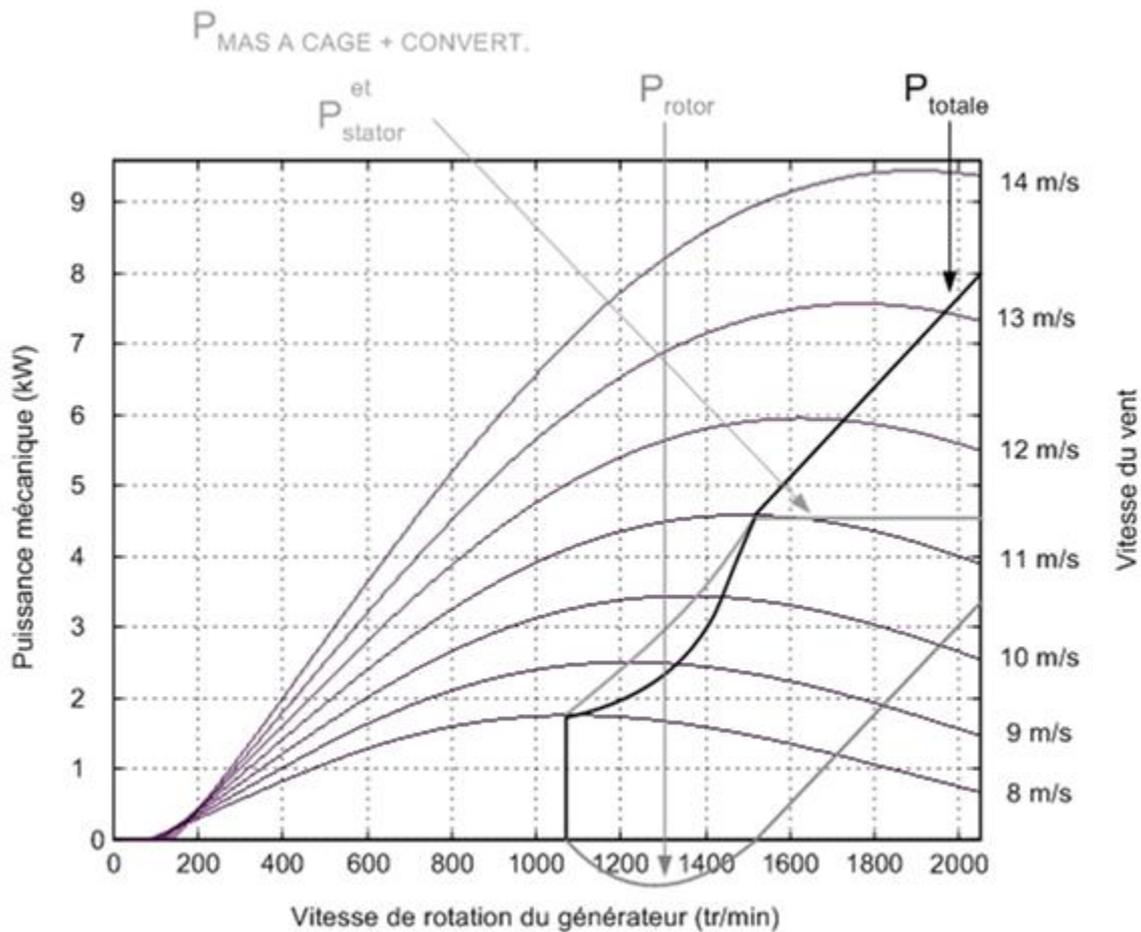


Figure III.33 : caractéristique de production d'énergie optimale de la MADA et de la machine à cage

III.4. Modélisation et différentes méthode de commande de la MADA :

III.4.1. Modèle et Identification des paramètres de la machine :

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet lors de cette modélisation, on assimile la cage d'écureuil à un bobinage triphasé. La seule différence réside dans le fait que ces enroulements ne sont plus systématiquement en court-circuit par conséquent les tensions diphasées rotoriques du modèle que l'on rappelle ci-après ne sont pas nulles.

Rappel du modèle diphasé de la MADA :

Equations électriques :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \dot{\theta}_s \varphi_{qs} \\
 V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} - \dot{\theta}_s \varphi_{ds} \\
 V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \dot{\theta}_s \varphi_{qr} \\
 V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} - \dot{\theta}_s \varphi_{dr} \\
 \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\
 \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\
 \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\
 \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs}
 \end{array} \right. \quad (25)$$

Equation mécanique :

$$\Gamma_{em} = \Gamma_r + f\Omega + \frac{d\Omega}{dt} \quad (26)$$

Les méthodes d'identification des paramètres mécaniques (inertie et coefficient de frottements visqueux) et des paramètres relatifs au stator (résistance d'une phase statorique et fuites magnétiques statoriques) sont identiques à celles de la machine à

cage. L'identification des paramètres rotoriques n'est pas problématique puisque les bobinages sont accessibles.

III.4.2. différentes méthode de commande de la MADA :

L'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet de nombreuses investigations en recherche autant en fonctionnement moteur qu'en fonctionnement génératrice. Le but de ces dispositifs est dans la plupart des cas d'amener le glissement à la valeur désirée avec le meilleur rendement possible en alimentant les enroulements rotoriques par un cyclo-convertisseur ou plus récemment par un dispositif redresseur-onduleur. Les grandeurs de commande sont, dans le cas d'une commande vectorielle classique, le plus souvent la vitesse et le flux (entraînant le classique problème de l'estimation du flux) mais certains modes de fonctionnement spécifiques amènent à choisir d'autres grandeurs. C'est le cas du dispositif de la Figure 32 où la vitesse Ω , la tension du bus DC UDC, le facteur de puissance côté stator k_s et côté ligne k_l sont contrôlés. La vitesse est directement contrôlée de façon à suivre la caractéristique de production d'énergie optimale (Figure 34). Cette structure permet de contrôler le facteur de puissance de l'installation sur les quatre quadrants de fonctionnement. En revanche, une telle commande nécessite une boucle interne de régulation du couple et par conséquent une mesure ou une bonne estimation de celui-ci. Cette boucle de régulation peut éventuellement être remplacée par le coefficient de proportionnalité liant le couple au courant rotorique d'axe d (pour le repère choisi dans cet exemple). Cette solution est plus simple à mettre en œuvre mais nécessite une bonne précision du coefficient liant les deux grandeurs.

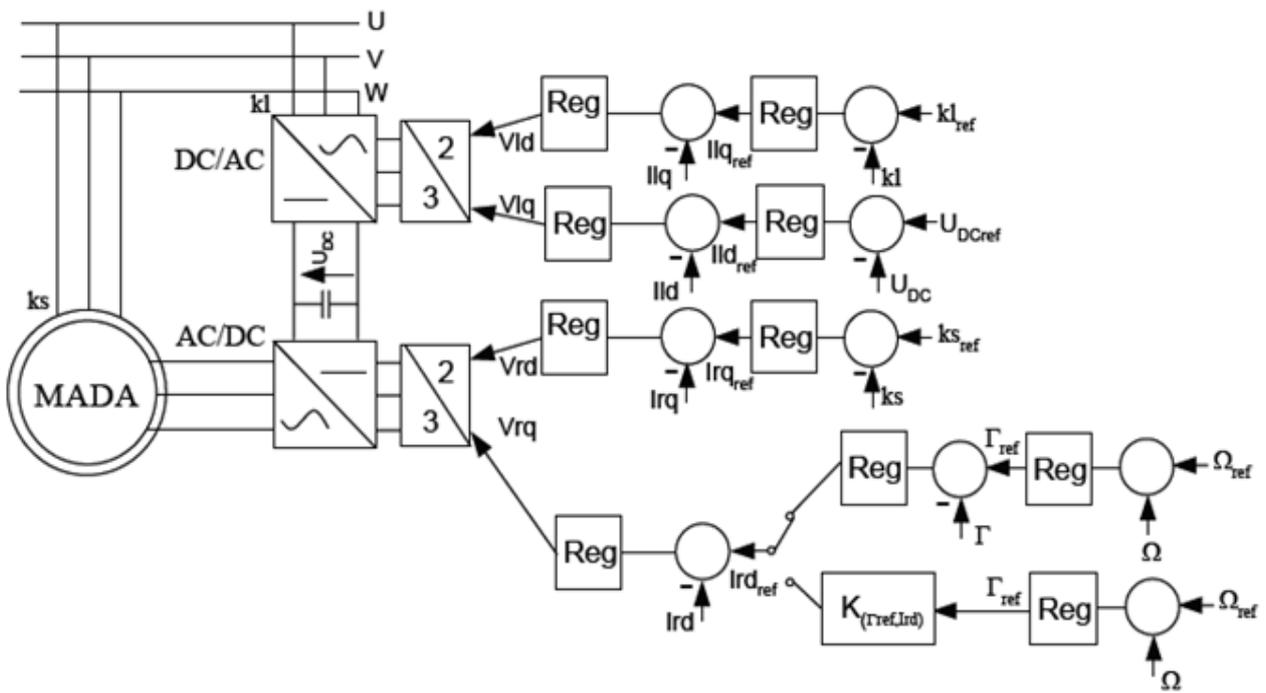


Figure III. 34 : MADA avec quatre boucles de régulation

La présence d'un convertisseur placé entre le stator et le réseau en plus du convertisseur rotorique a également été envisagée. Cette structure permet d'obtenir une plage de variation de vitesse plus élevée que dans le cas d'un convertisseur unique au rotor (jusqu'à $\pm 1,7$ fois la vitesse nominale). La taille des convertisseurs est limitée grâce à une optimisation des puissances qui traversent chacun de ces convertisseurs. La configuration de ce dispositif est présentée sur la Figure 35.

Malgré l'avantage de pouvoir faire varier facilement la vitesse sur une large plage, ce système nécessite un nombre d'interrupteurs statiques important. La commande de ces interrupteurs, les capteurs de mesure et les cartes d'entrées / sorties en font un système assez lourd à concevoir. De plus, la puissance dissipée par le convertisseur statorique est importante ce qui augmente son coût et la taille des radiateurs des semi-conducteurs.

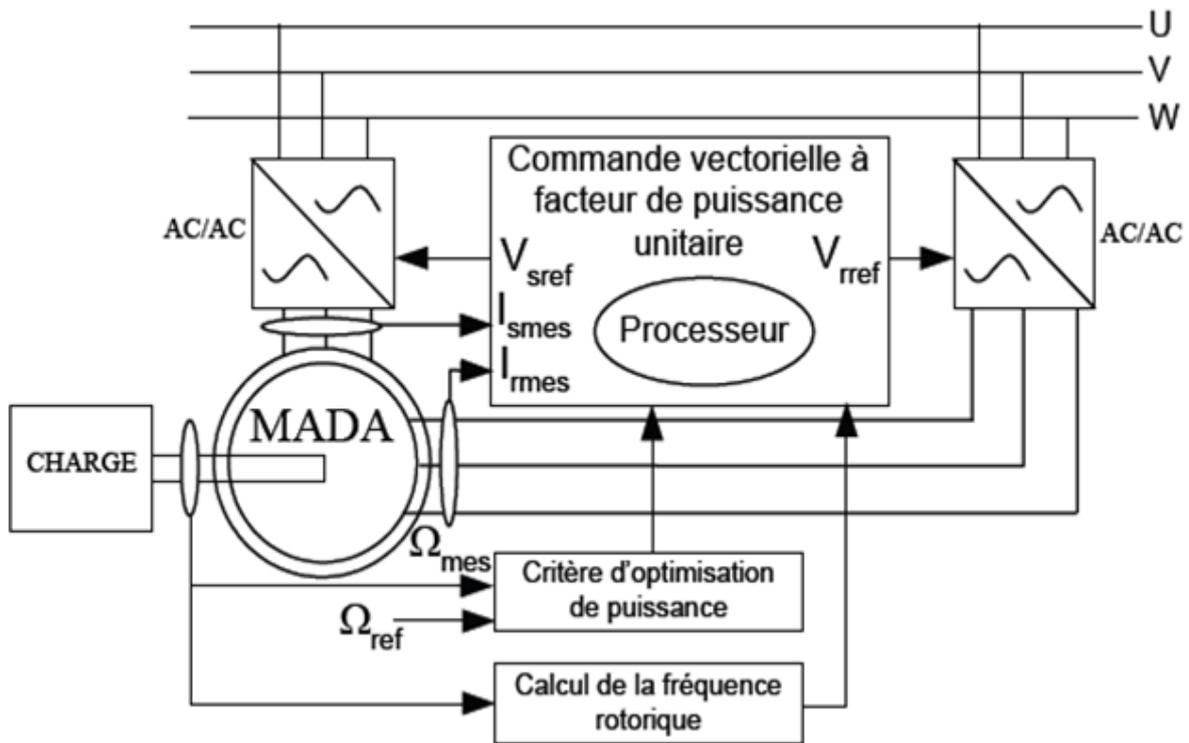


Figure III.35 : MADA avec convertisseurs statoriques et rotoriques

Notons que dans un système éolien utilisant la MADA, une des grandeurs asservies est fréquemment la vitesse de rotation et ce pour assurer un rapport d'avance $\lambda = \frac{\Omega 1R}{V_{vent}}$ optimal. Si la vitesse du vent est mesurée, la valeur de λ étant connue, le calcul de la vitesse de référence

Ω_1 est simple. Cependant, la mesure de la vitesse du vent est difficile et peu fiable car l'anémomètre est placé sur la nacelle de l'éolienne là où les turbulences sont les plus élevées.

Une autre méthode de calcul de la vitesse de référence consiste alors à suivre le point de fonctionnement optimal non plus dans le plan vitesse du vent – vitesse de rotation (v, Ω_1) mais dans le plan vitesse de rotation – couple aérodynamique (Ω_1, Γ_a), ce couple étant celui exercé par le vent sur les pales de l'aérogénérateur. La mesure de la vitesse du vent n'est alors plus nécessaire mais le couple aérodynamique doit être estimé. Le calcul de la vitesse de référence est alors donné par :

$$\Omega_{1ref} = \sqrt{\frac{\widehat{\Gamma}_a}{K_{t_{optimal}}}} \text{ avec } K_{t_{optimal}} = \frac{\rho}{2} R^2 C_p(\lambda_{opt}) \frac{1}{\lambda_{opt}^3} \quad (27)$$

III.8. Résumé :

Ce chapitre a permis de présenter la structure d'une machine asynchrone à double alimentation en comparaison avec les machines classiques de type synchrone ou asynchrone à cage.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut présenter cette machine par rapport aux structures classiques, nous avons analysé les possibilités qu'elle offrait en fonctionnement moteur et génératrice. L'analogie de fonctionnement qui peut être faite avec les machines synchrones dans la configuration des flux a conduit à dénommer cette machine : "machine généralisée".

Des structures de commande de la MADA présentées dans la littérature ont été présentées et analysées afin de montrer les points forts et les points faibles de chaque stratégie.

La stratégie de régulation finalement choisie pour l'utilisation de la MADA dans un système éolien est une commande vectorielle en puissances actives et réactives statoriques. La mise en équation, le choix du repère diphasé et les simplifications nécessaires à la synthèse de régulateurs est présentée.

Chapitre IV

Présentation du système global éolien-hydrolienne

IV.1. Introduction (présentation du système global éolien- hydrolienne) :

Un système hybride est par définition un système dans lequel plusieurs sources d'énergies différentes sont jumelées afin de fournir l'énergie nécessaire à un réseau isolé. Il existe principalement deux types de système hybride, soit les systèmes avec un bus à courant alternatif et les systèmes avec un bus à courant continu.

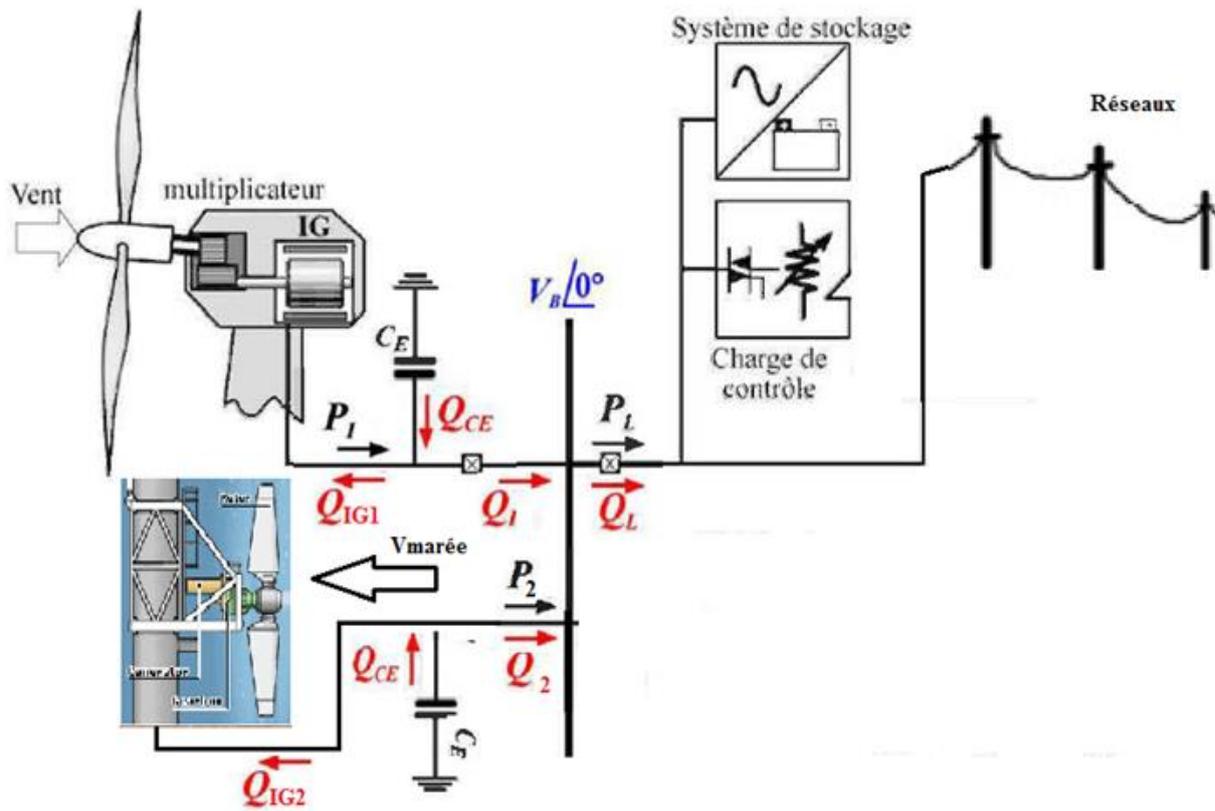


Figure IV. 36: le système global éolien-hydrolienne

Le système de base à étudier dans ce chapitre est représenté à la Figure 36. Une turbine éolienne connectée aux réseaux est couplé avec une turbine hydrolienne, à travers des

lignes de transmission supposées parfaites. Dans ce système de base, les deux systèmes envisagés est équipées d'une génératrice asynchrone double alimentation.

La compensation de l'énergie réactive est réalisée par deux condensateurs de compensation, un condensateur coté turbine éolienne et un autre coté turbine hydrolienne.

L'énergie du système globale est connectée aux réseaux, pour la distribuée aux différentes charges.

L'équilibre de la tension V_B sur le bus AC est lié à l'équilibre des puissances réactives. La tension de bus est stable lorsque toutes les sources de puissance réactive dans le système sont en équilibre avec toutes les charges de puissance réactive. On peut alors écrire :

$$\sum Q_{source} - \sum Q_{charge} = 0 \quad (28)$$

Un déséquilibre de puissance réactive dans le système, à la suite de connexion ou de la déconnexion d'une charge fortement réactive par exemple, se répercute sur la tension du bus AC, et tous équipements connectés à ce bus voient leur puissance réactive évoluée vers un nouvel équilibre. En termes de petites variations où ΔQ_S est l'apport externe de puissance réactive, on a :

$$\sum Q_{source} - \sum Q_{charge} = \Delta Q_S \quad (29)$$

On connecte une inductance commandée avec onduleur (figure 37) pour étouffer les variations de tension de bus AC en absorbant aussi rapidement que possible l'énergie réactive ΔQ_S .

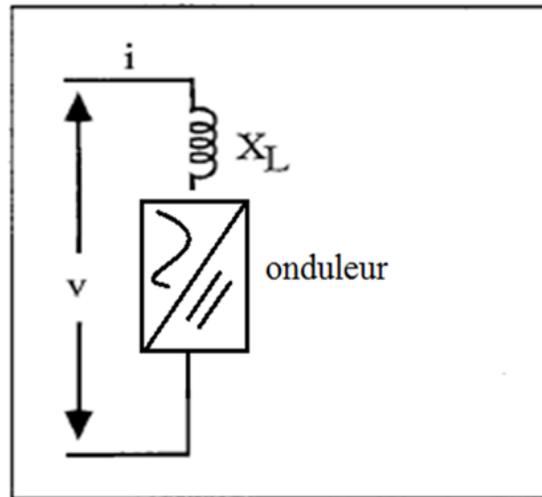


Figure IV. 37 : Inductance commandée

IV.2. le système global sous MATLAB :

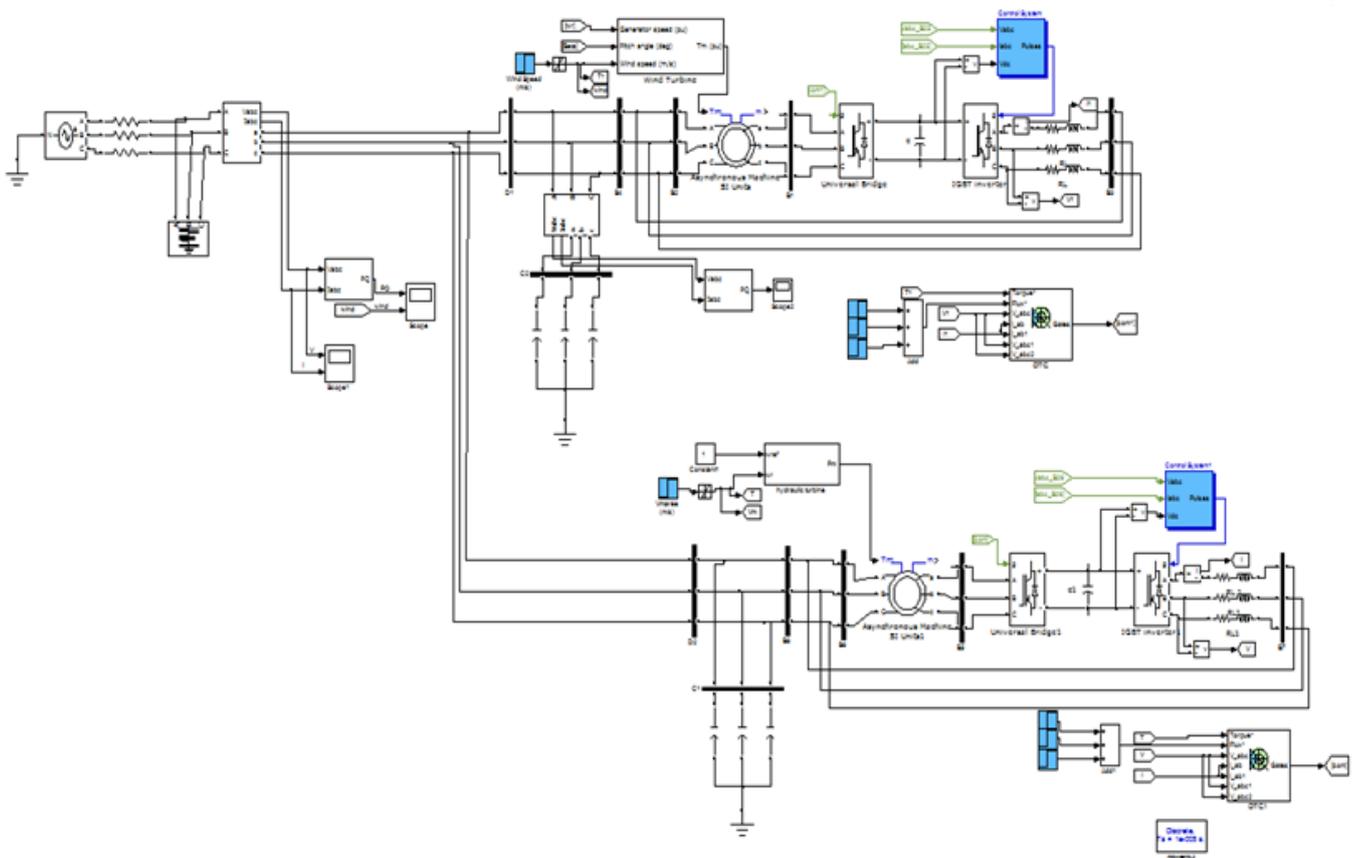


Figure IV. 38 : représente le système global sous MATLAB

Le système complet composé du modèle éolien, du modèle hydrolienne, système de stockage et du contrôleur de charge (figure 38).

IV.2.1. Résultat de simulation :

La Figure 39 montre les résultats obtenus avec différentes valeurs initiales de la charge et une variation de puissance réactive. On observe à chaque fois des transitoires durant les première seconde. L'amplitude de la variation est plus forte lorsque la charge initiale est élevée. On a alors une sensibilité accrue lorsque la puissance transitée dans le réseau est importante.

L'ajout d'un dispositif de compensation a pour principale objectif de réduire l'impact de l'ajout de puissance réactive pour une charge initiale donnée.

Lorsque le compensateur est branché au système et que l'on reprend l'expérience précédente on observe un retour plus rapide à l'équilibre.

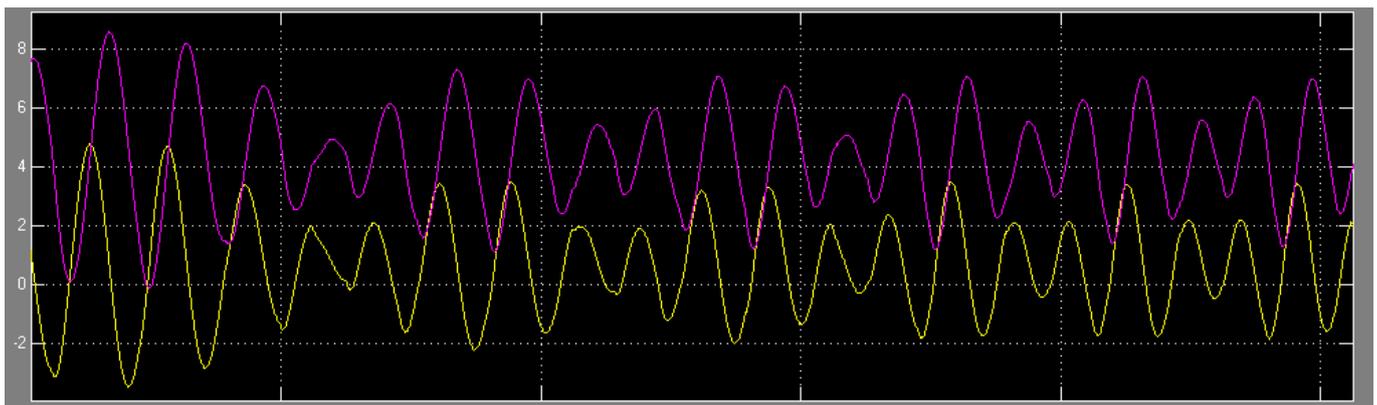


Figure IV. 39 : Variation des puissances active et réactive

Lorsque le compensateur est branché au système et que l'on reprend l'expérience précédente on observe un retour plus rapide à l'équilibre (Figure 40).

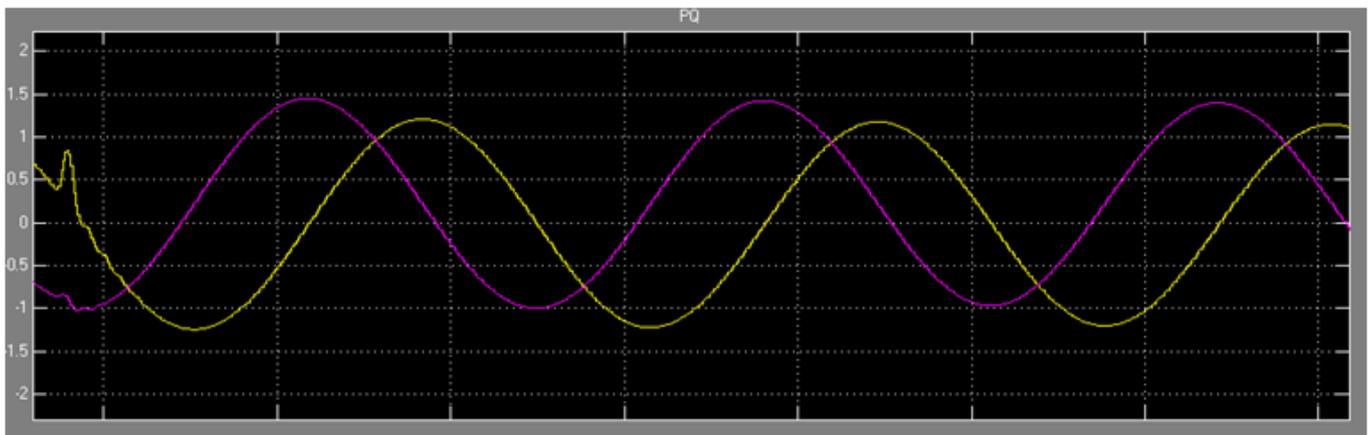


Figure IV.40: puissances active et réactive avec compensation

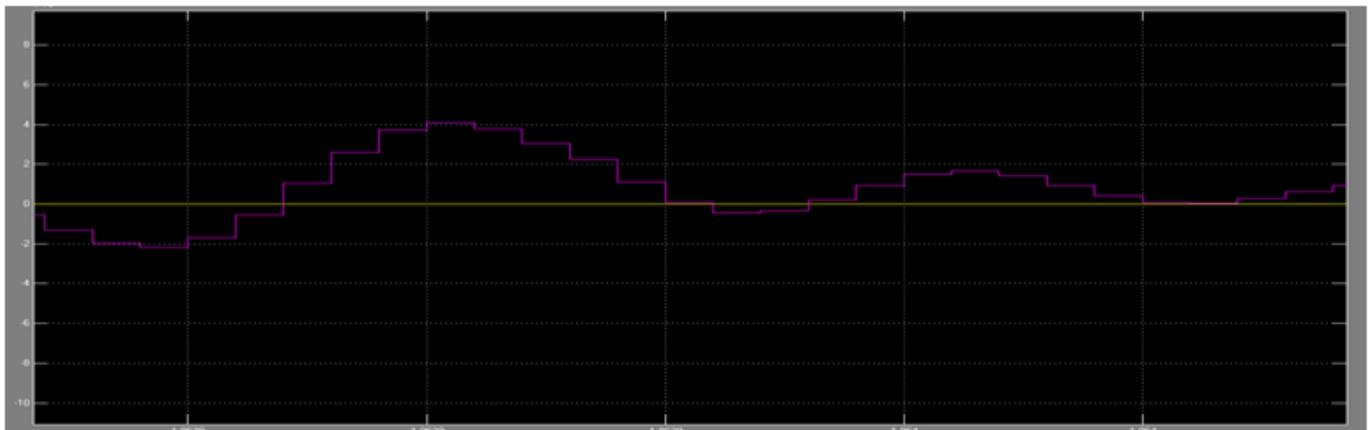


Figure IV. 41 : représente la puissance réactive du compensateur

IV.3. Résumé :

Dans ce chapitre nous avons présentés une étude complète du système hybride [éolien-hydrolienne] pour un site isolé. Enfin nous avons établi un modèle de simulation du système hybride sous l'environnement Matlab/Simulink.

Conclusion générale

Les ressources globales en énergie éolienne est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial.

Les travaux présentés dans cette thèse concernent la production d'électricité à partir système hybride (éolienne- hydrolienne).

L'objectif était de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides pour une charge et une probabilité de perte d'énergie donnée sous le critère d'un prix minimum du système.

La production d'électricité par le système hybride (éolienne- hydrolienne) répond bien à la problématique posée.

En premier temps, nous avons étudié les systèmes, éolienne et hydrolienne avec une modélisation qui montre l'importance des ressources renouvelables et ont a développé des systèmes de simulation sous Matlab qui nous a permet d'estimer la production d'énergie.

Dans la dernière partie nous avons étudié le système hybride et ont à contrôler la tension du bus alternative avec la variation de la puissance réactive.

Les résultats de simulation que nous avons obtenue montrent que la méthode choisie donne des bonnes estimations

Pour contribuer à la solution aux problèmes d'énergie, il est intéressant de développer des sources décentralisées de ces énergie .dans la recherche de telles solution, le système hybride développé pourra constituer un moyen très économique pour l'énergie d'électrification rurale et urbaine.

Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration de productivité de l'électricité :

- Capté le maximum d'énergie renouvelable et obtenir un bon rendement.

- On peut considérer l'énergie produite comme une réserve chaude pour le réseau national, par exemple le black-out d'Algérie en 2003, Elle peut remplacer le déclenchement de la turbine à gaz de 200 MW d'El Hamma.
- La diminution de la consommation de gaz pour produire de l'énergie électrique.

- Intégration de la MADA dans un parc éolien mixte avec ou sans stockage.

- Pour contribuer à la solution aux problèmes d'énergie, il est intéressant de développer des sources décentralisées de ces énergies. Dans la recherche de telles solutions, le système hybride développé pourra constituer un moyen très économique pour l'énergie d'électrification rurale

Tout cela demande autant d'études qui devraient apporter des solutions pour rendre encore plus facile l'insertion des éoliennes dans le réseau électrique afin de produire une énergie propre et durable.

Bibliographie

Gen Power Products inc., "wet stacking and how to avoid it", information sheet 09, dec. 2010, www.genpowerproducts.com.

H. James Green & al., "Wind/hybrid power system testfacilities in the united states and Canada", Windpower 94, May 10-13-94, pp.647-656.

N.H. Lipman, and D.G. In:field, "Wind-diesel systems", Wind Energy Conversion Systems, ed. L.L. Freris, Prentice Hall International (1990), pp. 330-356.

S. David Ailey, "Generator basis applied to field problems", InterNational Electrical Testing Association, summer 1993.

Ray Hunter, George Elliot, "Wind-diesel systems", Cambridge university press, 1994.

A. M. Scharaf, E. S. Abdin, "A digital mode! for Wind-Diesel conversion scheme",_IEEE proceedings (1989), pp. 160-166.

Prabha Kundur, "Power Systems Stability and Control", Electric Power Reserch_Institute, McGraw-Hill, 1994.

Collen Spiegel, "PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab®", 181 ed., Elsevier Academie Press, 2008.

Alexander King, William Knight, "Uninterruptible Power Supplies", McGraw-Hill Professional, 1 st ed., 2002.

H. Nacfaire, "Wind-Diesel and Wind autonomous", Wind projects demonstration Proceedings (CEC-25-26 April1988), Elsevier Applied Science, 1988.

I. Kamwa, "Dynamic mode/ling and Robust Regulation of a no-storage wind-diesel hybrid power system ", Electric Power Research, 18(1990), pp. 219-233.

Willard W. Pulkrabek, "Engineering Fondamentals of the Internai Conbustion Engine", Prentice Hall

Résumé :

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés.

L'Algérie a fourni un grand effort pour l'électrification rurale et saharienne. En effet, le taux d'électrification national pour l'année 2001 est de 96%. Malgré le taux élevé, il existe toujours des foyers épars qui leurs électrifications par l'extension du réseau conventionnel est très coûteuse. Le système hybride de production d'électricité (éolien - hydrolienne) totalement autonome est la solution idéale pour ce genre de problèmes.

Aujourd'hui, ce sont les éoliennes qui prennent la place des moulins à vent. Les éoliennes transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, soit pour l'injecter dans un réseau de distribution, soit pour être utilisée sur place (site isolé de réseau de distribution). Pour résoudre le problème d'espace, elles sont de plus en plus souvent placées en mer : éolienne offshore et Hydrolienne.

Mots-clés :

Système hybride (éolien- hydrolienne)

Abstract:

The exploitation of renewable resources has been a great rise in industrialized countries and even in some underdeveloped countries. Algeria is in a great effort to provide rural electrification and Saharan Africa. Indeed, the national electrification rate for the year 2001 is 96%. Despite the high rate, there are still scattered to their homes electrification through the extension of the conventional network is very expensive. The hybrid power generation (wind - tidal) is completely autonomous solution for this problem.

Today, it is the wind that takes the place of windmills. Wind turbines convert mechanical energy into electrical energy or for injection into a distribution network or to be used on site (remote site distribution network). To solve the problem of space, they are more often placed in sea offshore wind and tidal.

Keywords:

Hybrid system (Wind-tidal)

ملخص:

إن استعمال الموارد المتجددة عرفت تطورا كبيرا في البلدان المصنعة و أيضا في بعض الدول السائرة في طريق النمو. وفرت الجزائر جهدا كبيرا للكهرباء القروية و الصحراوية . وبالفعل' النسبة الوطنية لسنة 2001 هي 96 بالمئة. وبالرغم من هذه النسبة المرتفعة يوجد دائما بؤر متعثرة وبالتالي تكون كهربتها بتمديد الشبكة مكلفة جيدا. النظام الهجين لإنتاج الكهرباء (ريحي- كهرومائي) يكون بالكامل ذاتيا و يكون هو الحل المثالي لهذا النوع من المشاكل.

اليوم الناعورات الهوائية لإنتاج الطاقة الكهربائية أخذت مكان الطاحونات الهوائية. الناعورات الهوائية تقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية إما لنقلها في الحال عبر الشبكة الكهربائية لغرض التوزيع إما تستهلك مباشرة. من أجل حل مشكل نقصان الطاقة الكهربائية إنهم غالبا يوضعون في البحر.

المصطلحات

النظام الهجين (ريحي- كهرومائي)