



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPEREUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES ELECTRONIQUE



N° d'ordre : M/GE/2021

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN ENERGIE RENOVELABLE

Option : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Par :

- **Mensous Housse**
- **Sallaye Siyyidali**

Intitulé du sujet

Modélisation et Simulation d'une Turbine Eolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Soutenu le : / / 2021 devant le jurée composé de :

Président : Mr. Chaouech Abdellah

Examineur : Mr. Omari Hamza

Encadreur : Mr. Bekkouch Benaisa

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

En premier nous remercions le DIEU tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Nous remercions notre encadreur Mr. BEKKOUCHE Benaisa et notre Co-encadreur Mr. Guezgouz Mohammed au département Génie Electrique, Faculté des sciences et Technologie à l'Université Abd El Hamid Ibn Badis Mostaganem, pour avoir accepté de diriger ce travail et à la réalisation de ce mémoire. Qu'elle trouve ici le

Nous tenons à remercier les membres de jury Mr. chaouech Abdellah et Mr. Omari Hamza pour avoir accepté d'examiner le travail.

Nous tenons à remercier profondément tous les enseignants et Administrateurs du département Génie Electrique et Sans oublier bien évidemment mes camarades de promos (2020-2021) qu'ils ont démontré à nos égards durant ces deux années. Nos vifs remerciements d'un grand nombre de personnes (nos parents, nos sœurs, et nos amis proches).

Nous remercions également toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail surtout Mr. Ben Achenhou, Mme. Bechiri et Larbi Arezki qui nous ont aidé à finaliser ce travail.

Et à tous ceux qui nous ont encouragé et cru en nous

Résumer

Cette thèse porte sur la modélisation d'un système de récupération d'énergie éolienne, à savoir une éolienne équipée d'une machine asynchrone à double alimentation. Dans un premier temps, afin d'évaluer les performances et la dynamique de l'éolienne, dans différentes conditions de fonctionnement, un modèle de notre système est implémenté sous Matlab/Simulink. L'objectif de cette modélisation est d'appliquer une commande pour contrôler indépendamment les puissances actives générées par la machine asynchrone à double alimentation et d'analyser son comportement dans différents états

تركز هذه الأطروحة على نمذجة نظام استعادة طاقة الرياح ، أي توربينات الرياح المجهزة بألة غير متزامنة مع مصدر طاقة مزدوج. أولاً ، من أجل تقييم أداء وديناميكيات توربينات الرياح ، في ظل ظروف تشغيل مختلفة ، تم تنفيذ نموذج لنظامنا تحت

.Matlab / Simulink

الهدف من هذه النمذجة هو تطبيق أمر للتحكم بشكل مستقل في القوى النشطة التي تولدها الآلة غير المتزامنة ذات التغذية المزدوجة وتحليل سلوكها في حالات مختلفة.

this thesis deals with the modeling of a wind energy recovery system, namely a wind turbine equipped with an asynchronous machine with double power supply. first, in order to assess the performance and dynamics of the wind turbine, under different operating conditions, a model of our system is implemented under matlab / simulink. the objective of this modeling is to apply a command to independently control the active powers generated by the double-fed asynchronous machine and to analyze its behavior in different modes.

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
ICHAPITRE I : L'ÉTAT DE L'ART DU SYSTÈME ÉOLIEN	5
I.1. INTRODUCTION.....	5
I.2. DÉFINITION D'UNE ÉOLIENNE :.....	5
I.3. HISTORIQUE D'ÉNERGIE ÉOLIENNE	6
I.4. AVANTAGES ET DÉSAVANTAGES DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	10
I.4.1. Les avantages.....	10
I.4.2. Les désavantages.....	11
I.5. TYPE D'ÉOLIENNES :.....	11
I.5.1. Les éoliennes à axe vertical :.....	12
I.5.2. Les éoliennes à axe horizontal :.....	15
I.6. DESCRIPTION D'UNE ÉOLIENNE :	18
I.7. L'ÉVOLUTION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE DANS LE MONDE :.....	24
I.7.1 Capacité mondiale des éoliennes :.....	24
I.7.2 Capacité des éoliennes en Algérie :.....	26
I.8 FONCTIONNEMENT D'UNE ÉOLIENNE :.....	28
I.9 MACHINES ÉLECTRIQUES ET SYSTÈMES DE CONVERSION D'ÉNERGIE	
ÉOLIENNE	29
I.9.1 Machines asynchrones à cage (MAS) :.....	29
I.9.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) (rotor	
bobiné) :	31
I.9.3 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique	
dissipée :.....	31
I.9.4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer :	32
I.9.5 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius	
avec cyclo-convertisseur :.....	33
I.9.6 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius	
avec convertisseurs MLI :	34
I.10 CONCLUSION	36

II. CHAPITRE II : MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN SYSTÈME
 ÉOLIEN À VITESSE VARIABLE BASÉ SUR UNE MACHINE
 ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION 37

II.1 INTRODUCTION.....	37
II.2 PRESENTATION DE LA MADA :	38
II.2.1 Structure de la machine et configuration électrique.....	38
II.3 MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA.....	40
II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	40
II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	41
II.3.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone	42
II.3.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone.....	43
II.4 MODELISATION DE LA MADA	43
II.4.1 Hypothèses simplificatrices	43
II.4.2 Modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation dans le plan $\alpha\beta$:	45
II.4.3 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan DQ :	48
II.5 LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA :	49
II.5.1 Définition :	49
II.5.2 Principe de la commande vectorielle :	50
II.5.4 Avantage et inconvénient :	51
II.6 CONTROLE VECTORIEL DE MADA :	52
II.6.1 Fonctionnement de la connexion au réseau :	52
II.6.2 Boucles de contrôle du courant du rotor :	52
II.6.3 Boucles de contrôle de la puissance et de la vitesse :	55
II.7 MODELISATION DE L'ÉOLIENNE	58
II.7.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES POUR LA MODELISATION MECANIQUE DE LA TURBINE	59
II.7.2 Modélisation de la turbine :	60
II.8 LE SUIVI DE POINT DE PUISSANCE MAXIMUM (MPPT) :	64
II.8.1 Définition :	64
II.8.2 Description simple concernant le MPPT :	64
I.9 CONCLUSION	67

CHAPITRE III : RÉSULTATS DE LA SIMULATION 69

III.1 INTRODUCTION	69
III.2 CHOIX DES PARAMETRES DU SYSTEME EOLIEN	69
<i>III.2.1 Partie « puissance »</i>	69
<i>III.2.2 Partie "commande"</i>	70
III.3 SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS :	70
<i>III.3.1 simulation du système sans turbine :</i>	70
<i>III.3.2 Simulation du système avec turbine :</i>	75
III.4 CONCLUSION	85
CONCLUSION GENERALE	86
ANNEX	87
BIBLIOGRAPHIE	90

Liste des Figures

<i>Figure I-1/ Principe du premier moulin à vent persan à axe vertical</i>	<i>7</i>
<i>Figure I-2:Un ancien moulin à vent antique dans les îles britanniques.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I-3:Effet du vent sur un corps creux.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I-4: Différents types de rotor de Savonius.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I-5:Principe de l'incidence variable.</i>	<i>14</i>
<i>Figure I-6:Différents types de rotor Darrieus</i>	<i>15</i>
<i>Figure I-7:Capteurs à axe horizontal</i>	<i>16</i>
<i>Figure I-8:Eolienne multipale.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I-9:Eolienne rapide</i>	<i>18</i>
<i>Figure I-10:Les composants essentiels d'une éolienne.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I-11</i>	<i>20</i>
<i>Figure I-12</i>	<i>20</i>
<i>Figure I-13</i>	<i>21</i>
<i>Figure I-14:Rotor d'une éolienne</i>	<i>21</i>
<i>Figure I-15:Éléments d'une nacelle.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure I-16:monde évolution des nouvelles capacités éoliennes installées.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure I-17:éolien dans le mix électrique de l'UE de la France métropolitaine</i>	<i>26</i>
<i>Figure I-18:Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s).....</i>	<i>27</i>
<i>Figure I-19:la variation de la puissance de sortie d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure I-20:Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure I-21:Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage</i>	<i>30</i>
<i>Figure I-22:MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure I-23:MADA structure Kramer.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure I-24:Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure I-25:Principe de fonctionnement du cyclo-convertisseur</i>	<i>34</i>
<i>Figure I-26:Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....</i>	<i>35</i>

<i>Figure II-1: Configuration générale de l'alimentation du système.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure II-2: Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure II-3: Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone</i>	<i>42</i>
<i>Figure II-4: Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone</i>	<i>42</i>
<i>Figure II-5: Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone</i>	<i>43</i>
<i>Figure II-6: Représentation simplifiée de la MADA.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure II-7: Différents référentiels pour représenter les vecteurs spatiaux du MADA.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure II-8: Modèle du MADA dans le référentiel</i>	<i>47</i>
<i>Figure II-9: Modèle du MADA dans le référentiel dq</i>	<i>49</i>
<i>Figure II-10: Principe de la commande vectorielle.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure II-11: Référentiel dq rotatif synchrone aligné avec le vecteur spatial de flux statorique.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure II-12: Système équivalent de second ordre de contrôle de courant en boucle fermée avec régulateurs PI.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure II-13: Boucles de régulation de courant du MADA.</i>	<i>54</i>
<i>Figure II-14: Schéma bloc du régulateur PI par Matlab Simulink.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure II-15: Contrôle vectoriel complet du système</i>	<i>57</i>
<i>Figure II-16: Contrôle vectoriel complet du système développé sur MATLAB Simulink.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure II-17: Modèle mécanique simplifié de la turbine.</i>	<i>59</i>
<i>Figure II-18: Schéma de l'écoulement d'air à travers une éolienne.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure II-19: graphe de la simulation de lambda et le vent</i>	<i>63</i>
<i>Figure II-20: Schéma block Simulink de la turbine</i>	<i>63</i>
<i>Figure II-21: Contrôle de vitesse indirect.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure II-22: Schéma bloc Simulink de M I</i>	<i>67</i>
<i>Figure II-23: Schéma block du système développé sur MATLAB Simulink.....</i>	<i>67</i>

MONOCLATURES

ABREVIATIONS :

WCED: le World Commission on Environment and Development

ER : Energie Renouvelable.

PI :proportionnel intégral

API : Automate programmable

MLI : Modulation de Largeur d'impulsion

MPPT :Maximum power point tracker

MADA : Machine Asynchrone a Double Alimentation .

MAS : Machines asynchrones à cage

GWEC :Global Wind Energy Council

LCOE : coût actualisé de l'énergie

IGBT :InsulatedGateBipolar Transistor

GTO : GateTurn-off Thyristor

L'ONM :!l'Office National de la Météorologie

DSP : Digital Signal Processor

PLL : Phase-locked loop

ISC : control de vitesse indirect

VSWT : Variable Speed Wind Turbine

Liste non-exhaustive des principaux paramètres et variables

Paramètres

C	condensateur du bus continu	F
C_{pmax}	valeur maximal du coefficient de puissance de la turbine	-
f	fréquence imposée par le réseau électrique	Hz
G	gain du multiplicateur	-
I_r	valeur efficace des courants rotoriques de la MADA	A
I_s	valeur efficace des courants statoriques de la MADA	A
J_m	moment d'inertie de la MADA	kg.m ²

J_t	moment d'inertie de la turbine	kg.m ²
L_m	inductance magnétisante de la MADA	H
L_r	inductance cyclique rotorique de la MADA	H
L_s	inductance cyclique rotorique de la MADA	H
m	rapport de transformation rotor/stator de la MADA	-
N_r	nombre de spires du bobinage rotorique de la MADA	-
N_s	nombre de spires du bobinage statorique de la MADA	-
N_m	vitesse de rotation nominale de la turbine	tr/min
P	nombre de paires de pôles	-
R	longueur d'une pale	m
R_c	résistance de charge	Ω
R_f	résistance du filtre RL	Ω
R_r	résistance du bobinage rotorique de la MADA	Ω
R_s	résistance du bobinage statorique de la MADA	Ω
s	seuil pour la prédiction des courants de phase	-
S	surface circulaire balayée par la turbine	m ²
U_r	valeur efficace des tensions composées rotoriques	V
U_s	valeur efficace des tensions composées statoriques	V
v_{min}	vitesse de vent minimale	m/s
v_n	vitesse de vent nominale	m/s
v_{max}	vitesse de vent maximale	m/s
V_s	valeur efficace des tensions simples statoriques	V
E	constante des composantes directes ou inverses pour le FMV	-
φ_s	valeur efficace du flux statorique de la MADA	Wb
λ_{opt}	valeur optimale de la vitesse relative	-
ρ	masse volumique de l'air	kg/m ³
Σ	coefficient de dispersion de la MADA	-
ω_0	pulsation propre	rad/s
ω_c	pulsation de coupure du FMV	rad/s
ω_f	pulsation du fondamental du signal d'entrée du FMV	rad/s
ω_s	pulsation statorique de la MADA	rad/s
Ξ	facteur d'amortissement	-
Ω_{min}	vitesse de rotation angulaire minimale de la turbine	rad/s
Ω_n	vitesse de rotation angulaire nominale de la turbine	rad/s

Variables

C_{em}	couple électromagnétique de la MADA	Nm
c_k	signal issu du premier comparateur de la détection de défaut pour le CCM	-
c_k'	signal issu du premier comparateur de la détection de défaut pour le CCR	-
C_m	couple mécanique de la MADA	Nm

C_p	coefficient de puissance de la turbine	-
C_t	couple mécanique de la turbine	Nm
g	glissement de la MADA	-
$i_{c\alpha}, i_{c\beta}$	courants des charges dans le repère $\alpha\beta$ statorique	A
$i_{rd-reactive}$,	courant fondamental rotorique de la MADA d'axe d	A
$i_{rq-active}$	courant fondamental rotorique de la MADA d'axe q	A
i_{sd}, i_{sq}	courants statoriques de la MADA dans le repère de Park	A
N_m	vitesse de rotation de la MADA	tr/min
P_f	puissance active générée par le CCR	W
P_{mada}	puissance active du système éolien	W
P_r	puissance active rotorique de la MADA	W
P_s	puissance active statorique de la MADA	W
P_t	puissance mécanique de la turbine	W
V_V	vitesse du vent	m/s
v_{rk}	tensions rotoriques triphasées de la MADA	V
v_{rd}, v_{rq}	tensions rotoriques de la MADA dans le repère de Park	V
v_{sk}	tensions statoriques triphasées de la MADA ($k = \{1, 2, 3\}$)	V
v_{dc}	tension du bus continu	V
β	angle de calage des pales	°
λ	vitesse relative de la turbine	-
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	flux rotoriques de la MADA dans le repère de Park	Wb
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	flux statoriques de la MADA dans le repère de Park	Wb
$\varphi_{sdh}, \varphi_{sqh}$	flux harmoniques statoriques de la MADA dans le repère de Park	Wb
θ_e	angle électrique entre les bobinages rotorique et statorique de la MADA	rad
θ_r	angle de Park des grandeurs rotoriques de la MADA	rad
θ_s	angle de Park des grandeurs statoriques de la MADA	rad
ω_e	pulsation électrique entre les bobinages statorique et rotorique de la MADA	rad/s
ω_r	pulsation rotorique de la MADA	rad/s
Ω_m	vitesse de rotation angulaire de la MADA	rad/s
Ω_t	vitesse de rotation angulaire de la turbine	rad/s

I. Introduction générale

La population globale augmente jour après jour. La croissance démographique est plus rapide dans les pays en voie de développement que les pays industrialisés. En raison de cette croissance démographique et activités développementales, la demande énergétique augmente également. Pendant les dernières années, l'utilisation d'énergie primaire dans les pays industrialisés a augmenté à un taux de 1.5 pour cent par ans. Le changement correspondant des pays en voie de développement était de 3.2 pour cent. Avec cette tendance, la demande énergétique globale augmenterait considérablement dans les années prochaines. Les futures projections indiquent que tous l'approvisionnement en énergie primaire devrait être augmentée (pendant la dernière décennie du 20ème siècle, la capacité mondiale de vente a doublé approximativement tous les 3 ans)[1] [2].

En outre, les énergies classiques "non renouvelables" (le charbon, le pétrole, le gaz naturel...) sont polluantes et aussi nous ne pouvons pas construire notre avenir comme si nous avions du pétrole et de gaz pour toujours le contexte dramatique des "chocs pétroliers" des années 1970 la prouvé et ces combustibles fossiles sont les ressources finies et seront complètement épuisés pendant un jour ou l'autre [3] .

Le changement climatique et la raréfaction des ressources traditionnelles sont maintenant bien présents dans tous les esprits. Il est nécessaire de changer nos habitudes et de mettre en avant toutes les démarches vertueuses pour inverser les tendances.

Ainsi, le défi que tous les pays sont appelés à relever consiste à mettre en œuvre une transition vers un système énergétique plus sûr et moins polluant sans entraver le développement économique et social (IEA, 2007). La question qui se pose à ce stade est la suivante : **comment satisfaire la demande croissante en énergie finale tout en respectant l'environnement ?** A partir des années 1980, il y a eu l'émergence du concept de développement durable qui est défini par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (le World Commission on Environment and Development-WCED, 1987, p.8) comme étant un développement qui "répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ...". Par conséquent, une nouvelle version de la question précédente est apparue : **quel mix énergétique faut-il choisir pour suivre le chemin du développement durable ?** La réponse à cette question paraît évidente :

la transition vers les énergies renouvelables (ER) est le seul chemin à suivre et l'unique réponse à tous nos maux contemporains qui concernent l'environnement et le changement climatique. Bien que la solution soit évidente et facile à trouver, c'est plutôt la concrétisation de cette transition vers les ER qui reste difficile à réaliser. Ainsi, avec l'apparition du concept de développement durable, un intérêt grandissant a été accordé au secteur des ER et plusieurs pays ont commencé à fixer des objectifs et des stratégies dans ce domaine. En effet, vu que les énergies fossiles ne répondent pas aux exigences du développement durable, il est donc conseillé de chercher une énergie de substitution qui soit propre, inépuisable et qui favorise l'accès à l'énergie pour tous. Cette énergie est offerte gratuitement par la nature : il s'agit des ER. Ces ressources renouvelables sont des sources d'énergie issues de phénomènes naturels provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Les principales sources d'ER sont : l'hydraulique, la biomasse, l'éolien, la géothermie et le solaire. En effet, le problème d'épuisement des ressources fossiles, la lutte contre le réchauffement climatique et la volonté d'indépendance Introduction Générale 3 énergétique font des ER une priorité politique et un enjeu fort du développement durable. Par conséquent, il y a eu une augmentation remarquable des capacités installées des ER, à partir des années 1980. Cependant, le système énergétique mondial reste largement dominé par les combustibles fossiles [4].

Dans le domaine de l'énergie, les économies sont bien entendu indispensables, mais les sources d'énergies renouvelables devront également connaître une croissance sans précédent dans les prochaines décennies.

En particulier, parmi toutes les ressources possibles (biomasse, soleil, vent, houle, etc.), l'énergie éolienne est aujourd'hui la plus accessible en termes de technologie et de coûts. Elle est donc tout naturellement appelée à prendre une place importante dans le « mix » énergétique mondial [4].

La puissance du vent a été utilisée pendant au moins les 3000 dernières années. Jusqu'au début du 20ème siècle l'énergie éolienne a été utilisée comme moyenne de fournir la transmission mécanique de pomper l'eau ou de rectifier le grain. Au début de l'industrialisation moderne, l'utilisation de la ressource énergétique de fluctuation éolienne a été substituée par les moteurs mis le feu de combustible fossile, qui ont fourni une source d'énergie plus cohérente [2] [5].

Au début des années 70, avec le premier choc pétrolier, l'intérêt pour la puissance du vent a réapparu. Cette fois, cependant, le foyer principal était sur l'énergie éolienne fournissant l'énergie électrique au lieu de l'énergie mécanique. De cette façon, il est devenu possible de fournir une source d'énergie fiable et cohérente en employant d'autres technologies d'énergie.

Les premières turbines de vent pour la production d'électricité avaient été déjà développées au début du 20ème siècle. La technologie a été améliorée point par point depuis le début des années 70. Vers la fin des années 90, l'énergie éolienne a réapparu en tant qu'une des ressources énergétiques soutenables les plus importantes [2].

L'Algérie grâce à sa localisation géographique et sa grande surface se voit disposer d'un fort potentiel d'énergie renouvelable. En effet, l'Algérie a de vastes gisement énergétiques exploitables notamment le solaire et l'éolienne du a sont littorale qui s'étend à 1200km au nord avec des vitesse de vent moyenne annuelle comprise entre 2 et 6m/s estimé à produire actuellement 10KW jusqu'à 5GW en 2030. Au sud et à ses hauts plateaux qui reçoit une insolation dépassant les 2000h/ans et peut aller jusqu'à 3900h/ans avec une production estimée à atteindre 90 TWh à 170 TWh jusqu'à 2030 [6].

Néanmoins, l'Algérie se voit très en retard dans le développement et l'intégration de ses ressources par rapport aux autres pays et s'est vu privé d'occasions pour améliorer son économie et garantir une stabilité énergétique. Pendant plusieurs années, pour cela le gouvernement actuel a mis en œuvre une stratégie économique qui vise à diversifier sa production énergétique en intégrant les ressources renouvelables notamment dans les écoles et les zones isolé du réseau. Le programme actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [6].

A la faveur de ce nouveau programme, les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie. Ainsi d'ici 2030, 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable. A travers son programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur déterminé dans la production de l'électricité à partir des filières solaire et éolienne en intégrant la biomasse et la géothermie. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un

développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique [6].

C'est donc dans ce contexte que nous allons développer notre étude à travers les parties suivantes :

La première partie est consacrée à l'état de l'art ou on insiste sur l'histoire de l'éolienne, ses différents types, sa description et son fonctionnement.

Ensuite, dans la deuxième partie, on va modéliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA), ou on va détailler la structure de la machine, puis les modes de fonctionnement de la MADA, et son modèle dynamique dans le plan ABC et dq, puis le contrôle vectorielle utiliser et la modélisation de l'éolienne.

Puis a la troisième partie la simulation et interprétation de notre système. Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et nous proposerons quelques perspectives de recherche pour l'avenir.

I. Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

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 1940, 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. En outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante.

Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Dans ce chapitre en va présenter en détails toutes ces points décrit précédemment de l'historique des éoliennes jusqu'à les nouvelles stratégies de commandes.

I.2.Définition d'une éolienne :

L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable. Elle est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent (c'est la conversion d'énergie cinétique à l'énergie mécanique puis vers une énergie électrique).

L'origine du mot "éolienne" provient du nom Eole, dieu du vent dans la mythologie grecque.

Une éolienne "moteur à vent" est une haute tour (le vent souffle davantage en hauteur) en béton ou en métal, ressemblant à des derricks pétroliers, au sommet de laquelle tourne une hélice (généralement de 10 à 40mètre de diamètre). L'éolienne fonctionne sur le même principe que le moulin à vent. En d'autres termes, une éolienne est une machine qui capte l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières [7][5] :

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

- Soit directement pour entrainer par exemple des moulins ou des pompes de relevage d'eau.
- Soit pour entrainer une génératrice électrique. Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :
 - L'énergie peut être Stockée dans des accumulateurs.
 - L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

Dans la deuxième configuration, le générateur éolien peut fonctionner isolément ou en parallèle avec une autre source d'énergie électrique. Dans ces deux cas, les considérations économiques seront différentes. Pour un fonctionnement en parallèle avec d'autres sources d'énergie électrique, les puissances sont beaucoup plus importantes (100 kW et plus) ; le prix de revient minimal du kilowattheure produit est l'objectif qui imposera le dimensionnement, le choix, et la disposition des différents composants. Selon la gamme de puissance produite par l'aérogénérateur, on distingue les catégories des éoliennes suivantes [3]:

Eolienne de petite puissance	couvre la gamme de puissance de 20w à 50kw réparties en trois catégories : micro éoliennes, 100w maximum, mini éoliennes de 100 W à 10kW et petites éoliennes de 10 à 50 kW.
Eolienne de moyenne puissance	de 50 à quelques centaines de kW.
Eolienne de forte puissance	supérieur à 1MW.

I.3.Historique d'énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000ans avant Jésus Christ environ[1][2].

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

Il y a désaccord sur l'origine du concept de l'utilisation de vent pour la puissance mécanique. Certains croient que le concept trouve son origine dans l'ancienne Babylonie. L'empereur babylonien Hammourabi a prévu d'utiliser l'énergie éolienne pour son projet ambitieux d'irrigation au cours du dix-septième siècle avant Jésus Christ [1][2].

D'autres arguent du fait que le lieu de naissance des moulins de vent est l'Inde ; la première conception documentée de l'utilisation des moulins à vent en Inde datant d'environ 400 ans avant J.-C. Les Persans ont employé des moulins de vent pour mouliner les grains au cours de cette période. Telles étaient les machines à axe verticale ayant des voiles faites avec des paquets de roseaux ou de bois. La pierre de meulage a été fixée à l'axe vertical. Les voiles ont été fixées à l'axe central utilise les contrefiches horizontales. La taille des voiles a été décidée par les matières utilisées pour sa fabrication, habituellement 5 m de long et 9 m de grand [1][2].

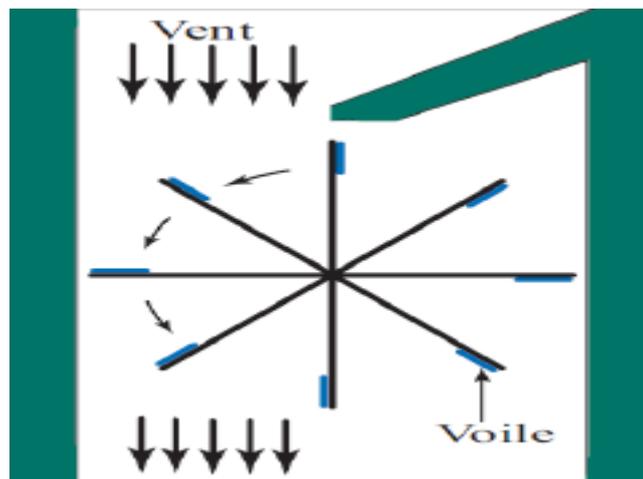


Figure I-1/Principe du premier moulin à vent persan à axe vertical

En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen-âge [2]. Les Français ont adopté cette technologie depuis 1105 A.D. et les anglais depuis 1191 A.D. contrairement à la conception persane d'axe vertical, les moulins européens ont eu un axe horizontal.

Ces postes de moulins ont été construits avec de belles structures. Les Néerlandais, avec le concepteur renommé Jan van Adriaenszoon, étaient les pionniers en faisant ces moulins. Ils ont apporté beaucoup d'améliorations de la conception et ont inventé plusieurs types de moulins. Utilisés tout d'abord pour mouliner le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés [1][8].

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

Dès le 13ème siècle, les moulins à vent étaient populaires partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du 19ème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive.



Figure I-2: Un ancien moulin à vent antique dans les îles britanniques

En Etats-Unis, ce sont les colons espagnols qui introduisent les premiers moulins à vent dans le nouveau monde au 16^{ème} siècle, durant l'ère coloniale, ils ont utilisés pour moudre le grain. Vers le milieu du 19^{ème} siècle, un nouveau type de moulin à vent apparait aux Etats-Unis beaucoup moins élégants que les moulins de type européens, qu'on le nom éolienne multi-pales "éoliennes américaines". Elle reste pour de nombreuses personnes, l'image traditionnelle d'une éolienne diffusée dans le grand public par les westerns [3].

C'est en 1802 que l'on a songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. Lord Kelvin en effet essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les « aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs.

Les premières recherches aérodynamiques sur l'aéronautique ont participé au développement des moteurs éoliens, et réalisation de grandes machines allant de 100 à 1000KW. Malheureusement, à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne.

Dès 1973, le processus inverse a, petit à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement ainsi que les aides gouvernementales fluctuent avec le prix du baril de pétrole et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). Toutefois au cours des dernières années se dessine une nette tendance au développement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution avec les machines de 300KW à 1.5MW. Les travaux sur les machines pour site isolés sont peu nombreux [7].

Ainsi, l'énergie en provenance du vent a dû être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du 19ème siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde. A la fin des années 80, le nombre de machines installées n'a cessé d'augmenter avec une forte croissance à la fin des années 90.

Le coût de l'énergie éolienne est en baisse constante ces dernières années. Parmi les facteurs ayant provoqué cette baisse, on peut citer la baisse de prix des aérogénérateurs, l'augmentation de la rentabilité et la baisse des coûts de maintenance. Avec la tendance vers des turbines plus grandes, la baisse des coûts d'infrastructures, et les réductions du coût des matériaux, le prix de l'énergie éolienne continue à diminuer régulièrement. En prenant surtout en compte le coût correspondant à la pollution causée par les autres sources d'énergie, le prix de l'énergie éolienne est encore compétitif [7].

I.4. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

I.4.1. Les avantages

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [7][9].
- L'énergie éolienne est une énergie propre, Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du Co₂. L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de Co₂ [7][9].
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO (dioxyde d'azote). Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides [9].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [7][8].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [7][9].
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [9].
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales. L'éolienne produite d'électricité en AC ce qui facilite son transport et l'intégration au réseau.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [7][9][10].

I.4.2. Les désavantages

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement :

- L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif ; des images de synthèses ont été élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites. C'est à dire là où il y a le plus de vent. Concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [9].

I.5. Type d'éoliennes :

La longue maturation des technologies dans les années 70-80 a fait émerger deux types de machines : les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical. Ces deux types peuvent être utilisés indifféremment dépendant principalement des préférences visuelles, des puissances nécessaires et de la ressource en vent [3].

I.5.1. Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical (axe de transmission perpendiculaire au sol) ont été probablement les premières utilisées par la suite elles ont été abandonnées au profit des éoliennes à axe horizontal. C'est assez récemment qu'elles ont été redécouvertes et ont fait l'objet de nombreuses études notamment de la part des chercheurs canadiens car elles présentent plusieurs avantages. Tout d'abord l'accès au générateur et aux principales composantes mécaniques est situé aux pieds de la tour. De plus, elles sont opérationnelles avec des vents multidirectionnels et sont plus efficaces avec des vents à faible vitesse. Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence[3][6] [11].

➤ La traînée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est le suivant: les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Figure). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius (Figure I.3), du nom de son inventeur, un ingénieur finlandais qui l'a breveté à la fin des années 1920. Le fonctionnement est ici amélioré par rapport à l'anémomètre par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur [6][11].

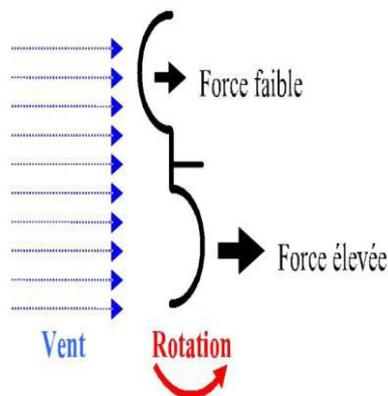


Figure I-3: Effet du vent sur un corps creux.

On peut aisément imaginer que, lors du démarrage de ce type de machine (phase d'établissement du vent), les cylindres soient orientés par rapport au vent de telle manière que

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

le couple résultant soit nul. L'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle l'un par rapport à l'autre, permet de remédier à ce problème, rendant ainsi la machine totalement autonome [11].

Le rotor de Savonius, étant très simple, présente un intérêt pour les pays très peu industrialisés car il est facile à fabriquer (Figure I. 4). De plus, il démarre à de faibles vitesses de vent, de l'ordre de 2 m/s. Les dimensions des machines à rotor de Savonius restent toutefois modestes, 3 à 4 m de hauteur maximale pour des diamètres de 2 m environ [6].



Figure I-4: Différents types de rotor de Savonius

➤ Variation cyclique d'incidence

Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par l'académicien Français Georges Darrieus. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique... (Figure I.5 et Figure I.6).

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

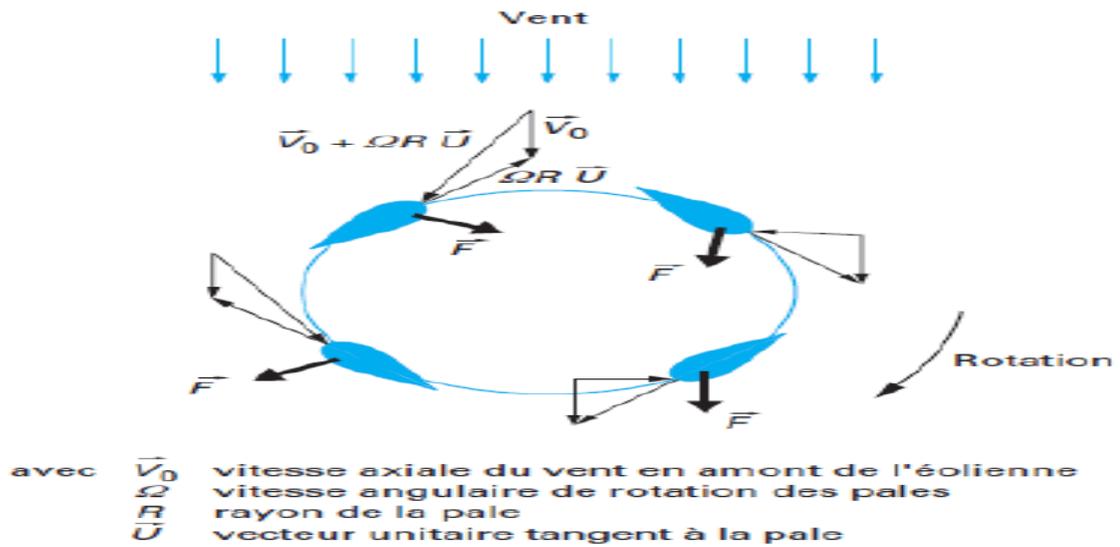


Figure I-5: Principe de l'incidence variable.

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable, ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales.

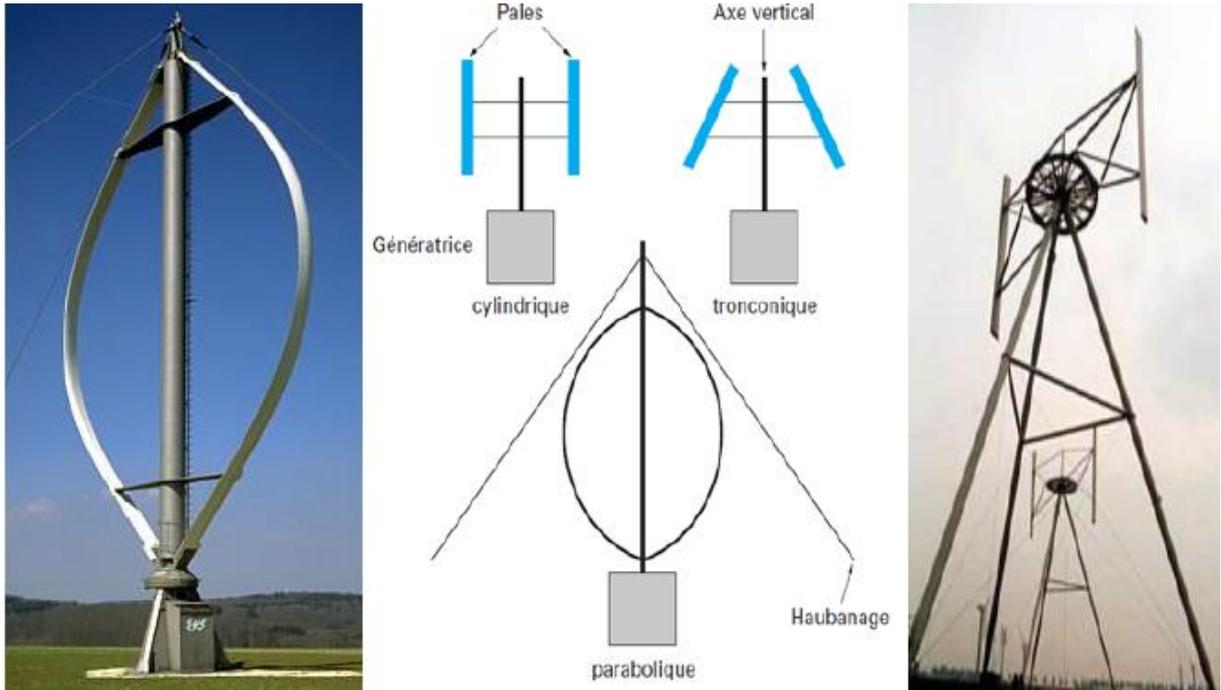


Figure I-6: Différents types de rotor Darrieus

I.5.2 .Les éoliennes à axe horizontal :

La plus part des éoliennes modernes sont à axe horizontal (ou à hélice) ce sont les modèles commerciaux actuellement les plus répandus, car leur conception est plus simple et leur rendement est supérieur à celui de tous les autres modèles. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau [4][9].

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent «hélice au vent», et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent « hélice sous le vent ».

Une machine « aval » est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont ».

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

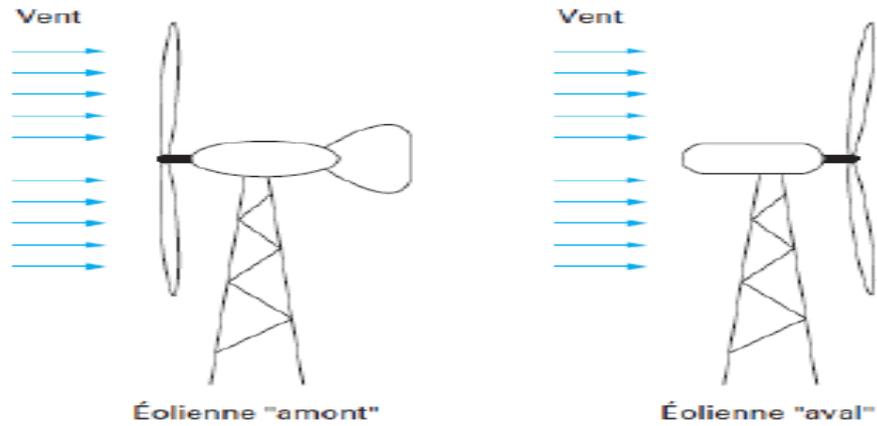


Figure I-7: Capteurs à axe horizontal

Sur base du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes : à rotation lente "multipales" et à rotation rapide "aérogénérateurs".

➤ A rotation lente

Construits aux Etats-Unis dès 1870, les éoliennes à rotation lente "multipales" peuvent comporter de 12 à 30 pales. Le plus souvent, ces éoliennes sont de petite taille: la roue à couramment un diamètre de 3 à 8 mètres. Ces éoliennes fonctionnent bien jusqu'à un vent de 7 à 8 m/s; au-delà, il faut prévoir un dispositif d'arrêt qui doit mettre la machine en sécurité. Ces éoliennes sont pourvues d'un gouvernail de direction pour orienter le disque normalement à la direction du vent. Les vitesses de rotation peu élevées (en regard du diamètre) font que ces machines de faible puissance sont utilisées principalement pour le pompage de l'eau [11] [12].

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

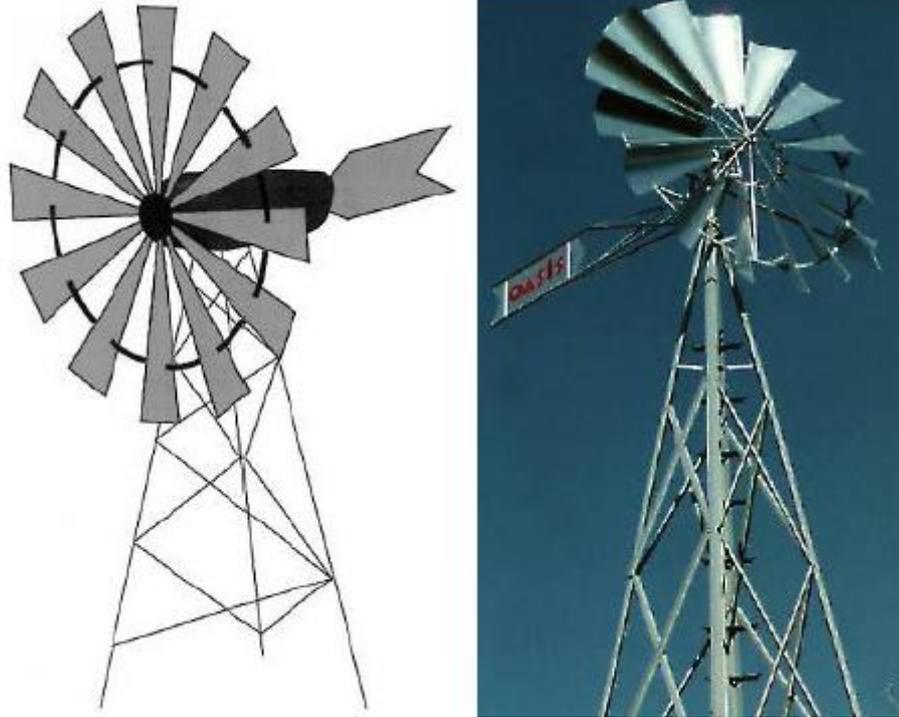


Figure 1-8: Eolienne multipale

➤ A rotation rapide

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[3].

La puissance nominale de ces capteurs est très étendue, de quelques dizaines de watts à quelques mégawatts, de même que la taille du rotor (de 1 à 100 mètres de diamètre).

L'optimisation du rotor a grandement bénéficié des travaux de recherche de l'aéronautique. Les éoliennes rapides obtiennent des rendements élevés.

Le disque éolien peut être placé en amont (hélice au vent) ou en aval (hélice sous le vent) du support [12].



Figure I-9: Eolienne rapide

I.6 .Description d'une éolienne :

Comme mentionné précédemment, il existe deux types de systèmes éoliens : les systèmes à axe vertical et ceux à axe horizontal, mais les éolienne les plus courants sont à axe horizontal donc dans ce mémoire on s'intéressera qu'à ceux à axe horizontal.

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, la tour (axe centrale), le rotor pourvu le plus souvent de trois pales et la nacelle abritant les machines pour une machine de type « amont » [8][6][11].

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

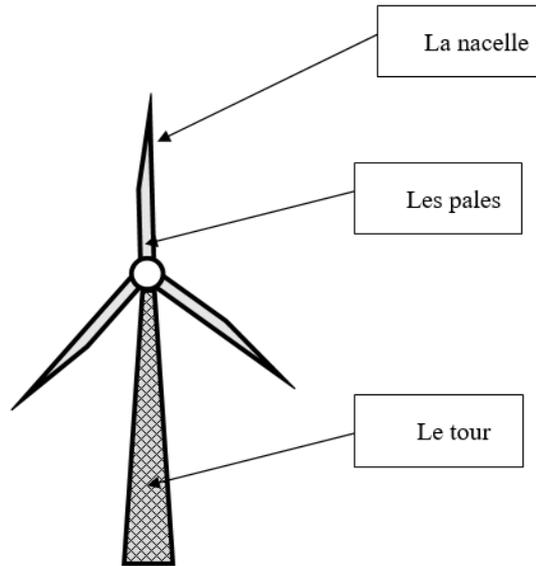


Figure I-10: Les composants essentiels d'une éolienne

➤ La tour "mat"

La tour est l'un des principaux composants d'une éolienne, Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (la nacelle et le rotor) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (nacelle et rotor) de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation. Elle a une hauteur allant de 40m pour les plus petites (~400kW) à 140m pour les plus grandes (~3.5MW) [3][11].

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer :

— mât haubané : il est simple de construction mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât. Il présente toutefois l'avantage de pouvoir sous traire l'éolienne à des conditions météorologiques extrêmes (forte tempête, cyclone). L'emprise au sol du haubanage peut devenir un obstacle à son utilisation Figure I.11.

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien



Figure I-11

— tour en treillis : son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain Figure I.12.



Figure I-12

— tour tubulaire : bien que de construction plus complexe, elle a la faveur des constructeurs car elle permet d'abriter certains dispositifs de régulation ou de commande et apporte une protection évidente aux personnels chargés de la maintenance qui doivent monter jusqu'à la nacelle (installation aisée d'une échelle voire d'un ascenseur intérieur). Son aspect esthétique est de plus un atout pour l'intégration visuelle harmonieuse de l'éolienne

Figure I-13 [11].

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien



Figure I-13

➤ Le rotor et ses pales

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable), d'un moyeu, d'un capot de moyeu et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor...). Les pales sont faites de polyester ou de bois époxy renforcé par de fibre de verre et parfois en matériaux composites, notamment avec de la fibre de carbone (légère et résistante) La forme des pales est dessinée pour faire tourner le rotor au moyen de l'air qui passe dessus [3][11].



21

Figure I-14: Rotor d'une éolienne

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

➤ La nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

— le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.

— l'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine [11].

— la génératrice : le cœur de l'éolienne est une génératrice qui se loge à l'intérieur de la nacelle (Figure I.15) elle transforme l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Il existe des éoliennes où sont utilisés plusieurs générateurs, l'un pour les basses vitesses et l'autre pour les régimes de vents élevés. La grande majorité des sources d'énergie électrique utilise des machines électriques tournantes qui réalisent une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, en utilisant un champ magnétique de couplage entre la partie fixe ou stator et la partie mobile ou rotor de la machine[3].

— un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur (il peut être un API « automate programmable ») qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor + nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

— divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

— un groupe hydraulique et ses servitudes si nécessaire.

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

— le dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à

L'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée : cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour. En effet, l'utilisation d'un collecteur tournant n'est guère envisageable au vu des intensités élevées qui transitent (parfois plusieurs centaines d'ampères). Au bout d'un certain nombre de tours de la nacelle, celle-ci est alors manœuvrée en sens inverse à l'aide des moteurs d'orientation pour dévriller le câble. Celui-ci est généralement muni d'un interrupteur qui empêche toute rotation supplémentaire de la nacelle en cas de défaillance du compteur [11].

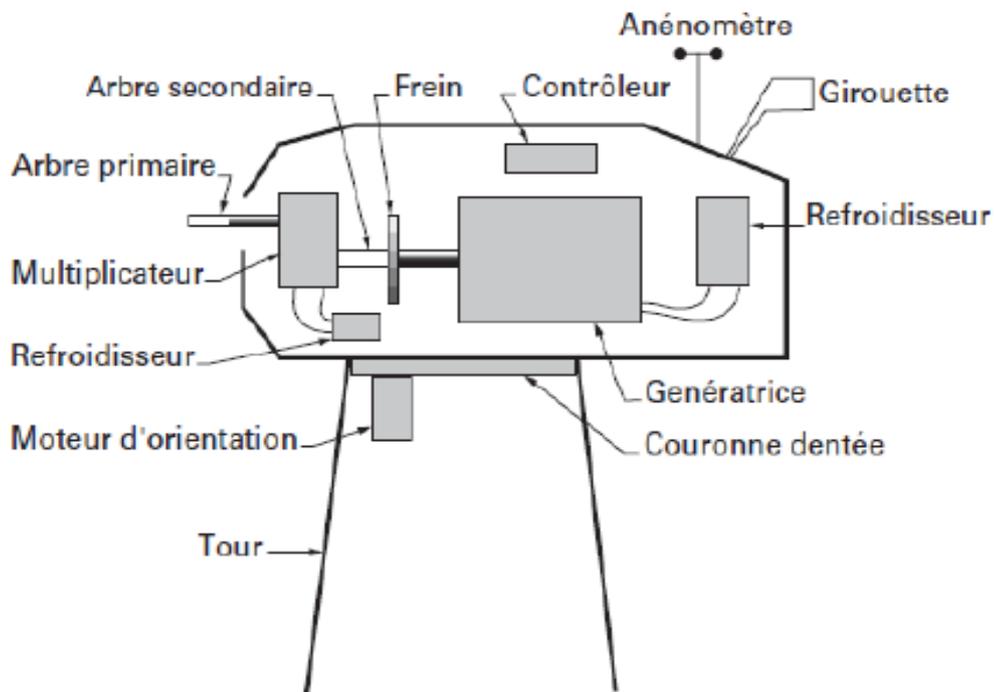


Figure I-15:Éléments d'une nacelle

I.7 L'évolution d'énergie éolienne dans le monde :

Même en prenant en compte les plus grandes turbines éoliennes actuelles, d'une puissance nominale de quelques mégawatts, la puissance délivrée par une seule turbine reste une quantité petite par rapport à celle d'une centrale conventionnelle. D'autre part, dans la majorité des pays, les zones proposant des vitesses de vent techniquement utilisables sont restreintes à quelques régions seulement. Ceci crée la nécessité d'assembler dans ces lieux autant d'éoliennes que possible, indépendamment de la demande énergétique locale. De cette façon apparaissent les parcs ou fermes éoliennes, qui consistent en une concentration de nombreuses éoliennes en groupes spatialement organisés et interconnectés. Ce groupement offre de nombreux avantages techniques.

De plus, d'un point de vue économique, il est plus intéressant en termes de coût d'installation et de raccordement au réseau, car de longues lignes d'interconnexion au réseau sont justifiées uniquement pour un nombre relativement élevé de turbines éoliennes.

Entre les années 1982 et 1985, les premiers grands ensembles d'éoliennes ont été installés en Californie, avec de petites unités élémentaires dont la puissance varie entre 20 et 100kW. En Allemagne, l'utilisation de l'énergie éolienne s'est basée dès le commencement sur l'installation de grandes turbines éoliennes en nombre important.

Les parcs éoliens de plusieurs mégawatts forment déjà une partie de la matrice énergétique de nombreux pays.

I.7.1 Capacité mondiale des éoliennes :

En 2019, près de 60,4 GW de capacités éoliennes ont été installées dans le monde (dont 6,1 GW offshore), soit 19% de plus qu'en 2018 (50,7 GW). Il s'agit de « *la deuxième meilleure année* » de développement dans l'histoire de la filière. Au total, la puissance installée du parc éolien mondial atteignait 651 GW à fin 2019 [13].

Ces données de puissance doivent être rapportées à la production d'électricité associée. Selon le GWEC, le parc éolien mondial a généré 1 390 TWh en 2019. Cette production équivaldrait ainsi à près de 5,8% de la consommation annuelle d'électricité dans le monde.

Les facteurs de charge moyens des parcs éoliens au niveau mondial sont estimés par le GWEC à 23% pour les installations terrestres et à 40% pour celles implantées en mer.

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

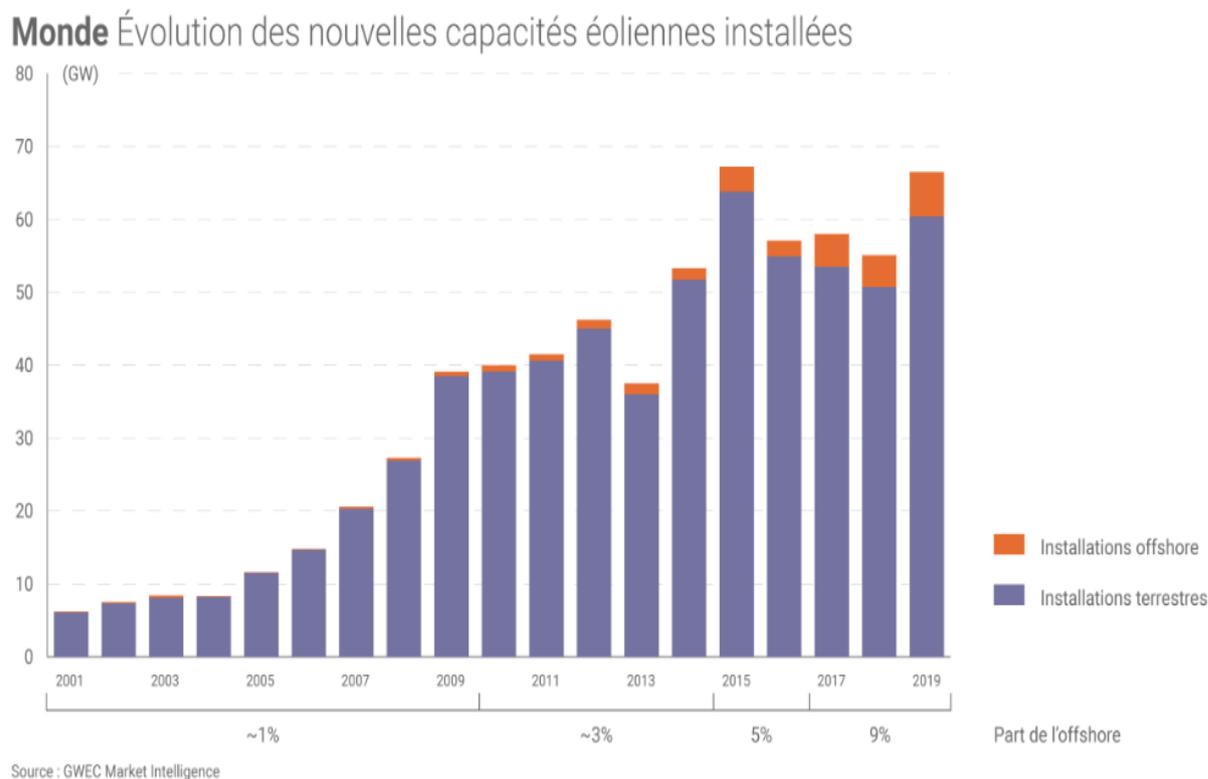


Figure I-16: monde évolution des nouvelles capacités éoliennes installées

À la fin de 2019, la Chine, les États-Unis, l'Allemagne, l'Inde et l'Espagne comptaient à eux cinq pour 73% de l'ensemble des capacités éoliennes installées dans le monde. (Connaissance des Énergies, d'après GWEC).

La Chine et les États-Unis restent de loin les premiers marchés au monde pour l'éolien terrestre : ces deux pays ont compté pour plus de 60% des nouvelles capacités terrestres installées en 2019. Il en va différemment pour l'éolien offshore : l'Europe reste le principal marché pour ces installations (59% des nouvelles capacités offshore en 2019), devant la région Asie-Pacifique (49% restants) [13].

Précisons que l'énergie éolienne a, en 2019, compté pour 13,4% de la production d'électricité dans l'Union européenne et pour 6,3% de celle en France métropolitaine.

Pour accélérer le déploiement de l'éolien, le GWEC appelle à « regarder au-delà du LCOE » (tout en soulignant que les coûts de l'éolien terrestre et offshore ont chuté de plus de 50% en moyenne au cours des 5 dernières années) et à utiliser des technologies émergentes comme des installations hybrides (associant par exemple éoliennes, panneaux photovoltaïques

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

et système de stockage) ou le recours à l'hydrogène « vert » afin d'apporter de nouvelles opportunités à ce secteur [14].

Début 2020, le GWEC envisageait une année « record » pour le développement de l'éolien dans le monde (prévision de 76 GW de nouvelles capacités). Compte tenu de l'épidémie de Covid-19, les prévisions de l'association sur le marché éolien durant la période 2020-2024 devraient être révisées au 2^e trimestre 2020 [13].

Éolien Part dans le mix électrique de l'UE et de la France métropolitaine en 2019

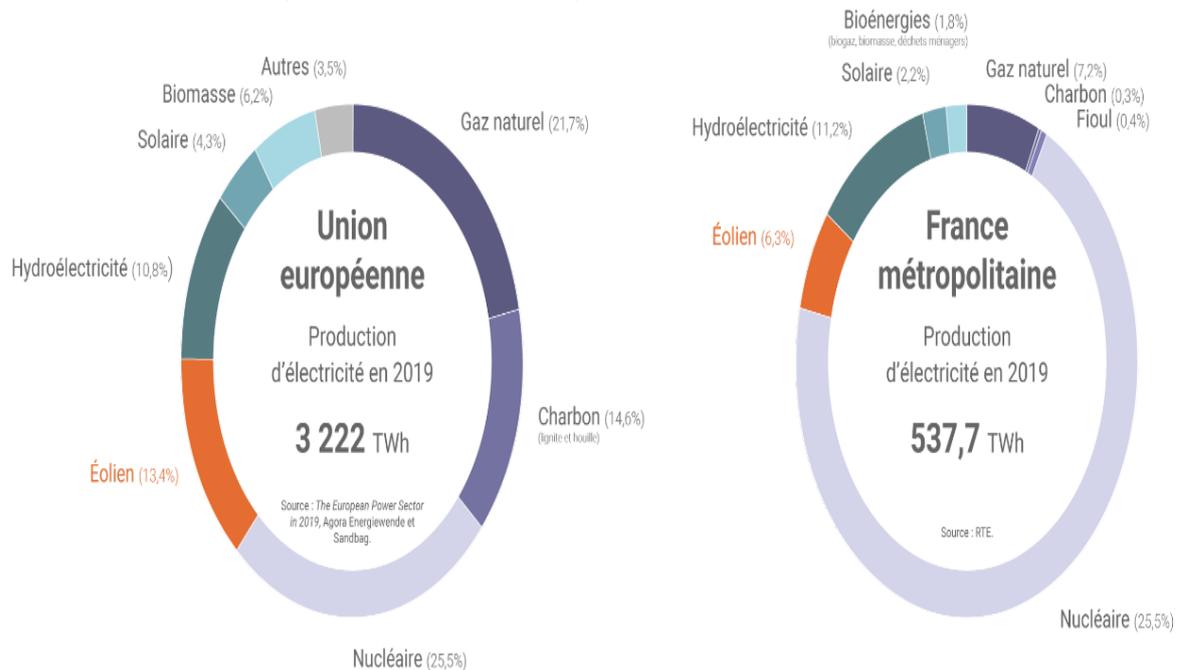


Figure I-17: éolien dans le mix électrique de l'UE et de la France métropolitaine

L'éolien est la 4^{ème} source d'électricité dans l'Union européenne, comme en France métropolitaine. (Connaissance des Énergies, d'après GWEC)

I.7.2 Capacité des éoliennes en Algérie :

En Algérie, la première tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) conçu par l'ingénieur français Andreau. Ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Electricité et Gaz d'Algérie. La

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

deuxième tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique fus en 2014 à Kaberten situé à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar à capacité de 10.2 MW, ce parc éolien a été mis en service début juin 2014. Il est composé de 12 éoliennes, la puissance de chaque éolienne est de 850 kW et leur diamètre est de 52 mètres avec une hauteur du mât de 55 m. Les éoliennes sont implantées sur un site d'une superficie globale de 33 hectares. L'énergie électrique fournie par ce parc éolien est injectée dans le réseau MT local. Le taux de pénétration de l'énergie éolienne est de 5% par rapport au réseau local. L'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables [15].

Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme, Selon les prévisions du groupe Sonelgaz, La capacité totale à installer à l'horizon 2030, fixée 5010 MW pour l'éolien pour la période 2015-2020, il est programmé de réaliser 1GW en éolien parmi ces projets on trouve la réalisation de deux fermes éoliennes, une de 50MW à Timimoune et l'autre de 20MW à Khenchela. Le nouvel Atlas éolien de l'ONM a mis en évidence l'existence d'autres sites ventés dans d'autres régions du Sud. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un important potentiel. Cette étude a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia qui a réactualisé la carte des vents à 10m (Figure I.18)[15].

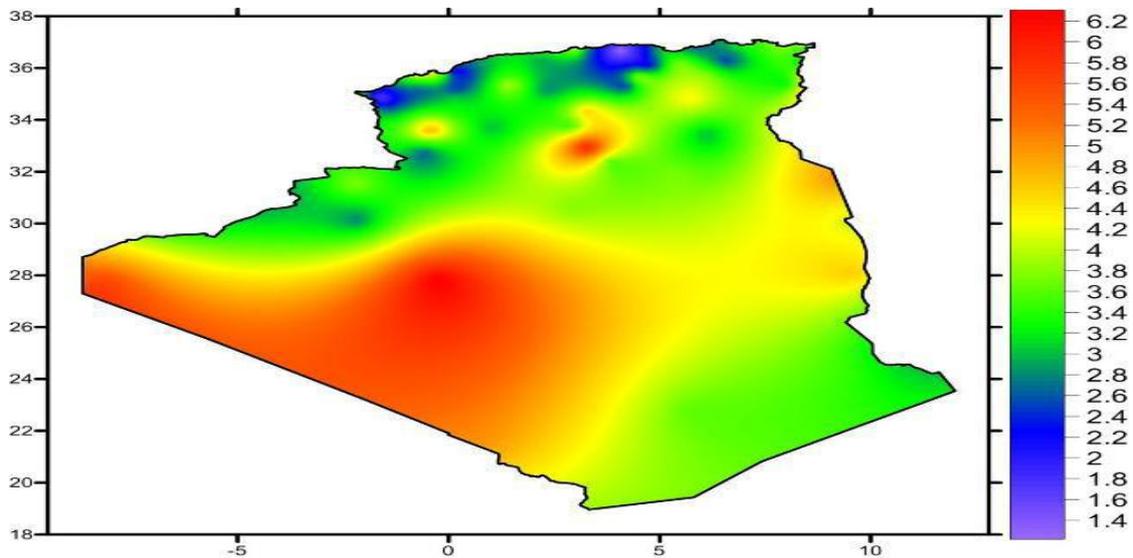


Figure I-18: Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)

I.8 Fonctionnement d'une éolienne :

Si l'on se réfère à l'histoire de l'aventure éolienne et plus précisément au début de l'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique en 1891, on ne constate pas vraiment de changements fondamentaux dans les principes de fonctionnement.

Il faut d'abord lever bien haut l'éolienne pour qu'elle puisse profiter au maximum des vents, ceci nécessite une tour toujours élevée par rapport à la taille de l'éolienne, proprement dite « Une petite éolienne va être installée au moyen à 10 mètres de hauteur, c'est-à-dire au moins aussi haut que le sommet des poteaux électriques. Une grande éolienne s'élèvera à plus de 100 mètres ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 30 étages »

Lorsque le vent se met à souffler (à partir de 2 ou 3 m/s soit environ 7 km/h), il exerce un système de forces sur les pales qui alors se met à tourner, le mouvement du rotor est transmis à une génératrice de courant.

Les génératrices étant prévues pour tourner plus vite que les rotors d'éoliennes, la transmission se fait alors à travers un multiplicateur de vitesse qui a pour rôle de démultiplier la vitesse de rotation, dans le but d'obtenir une vitesse suffisamment importante pour la génératrice. Certains constructeurs ont mis au point des modèles qui fonctionnent avec des génératrices à basse vitesse qui ne nécessitent pas de multiplicateur.

Lorsque la vitesse du vent dépasse 90 km/h (plus de 25m/s), les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants.

La génératrice délivre alors un courant électrique qui est ensuite stockée dans des batteries pour les plus petits modèles d'éoliennes ou transféré sur le réseau électrique pour les autres [16] [3].

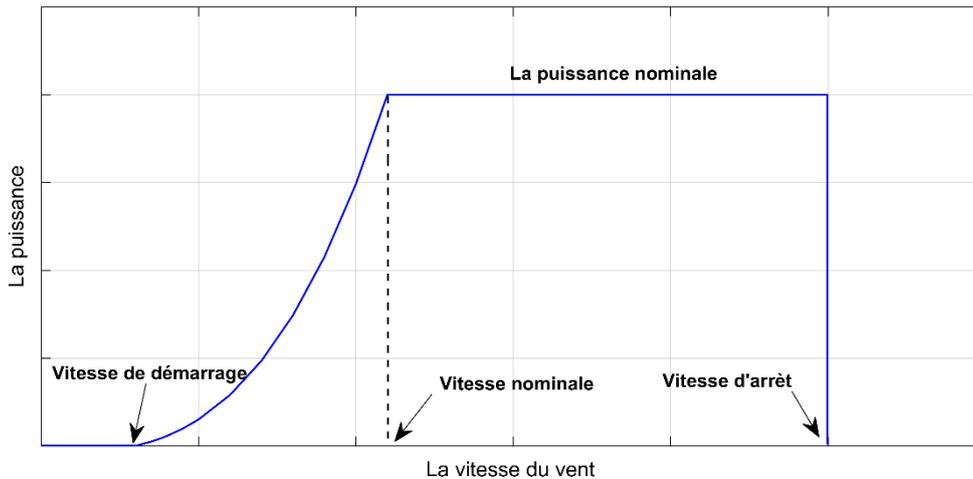


Figure I-19: la variation de la puissance de sortie d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent

I.9 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Machine complexe capable de transformer une forme d'énergie en une autre et/ou d'utiliser cette transformation pour produire un effet donné, pour agir directement sur l'objet de travail afin de le modifier selon un but fixé [17].

On peut classer dans cette catégorie et cela du point de vue physique : une turbine, une pompe un compresseur, un moteur, un générateur etc..., puisqu'ils transforment, convertissent, ou produisent une certaine énergie.

D'une manière générale, on ne classe dans la catégorie des «Machines électriques» que les ensembles utilisant ou produisant de l'énergie électrique. Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. .

Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités [10][11].

I.9.1 Machines asynchrones à cage (MAS) :

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) est donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée (Figure I.21), mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (Figure I.20).

Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au-delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes dont on a déjà dit qu'elle occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients. [12]

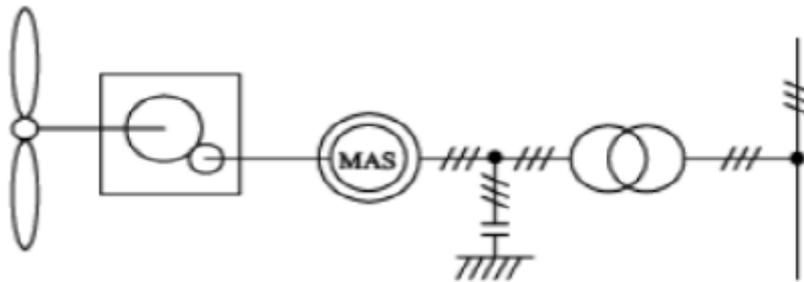


Figure I-21: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage

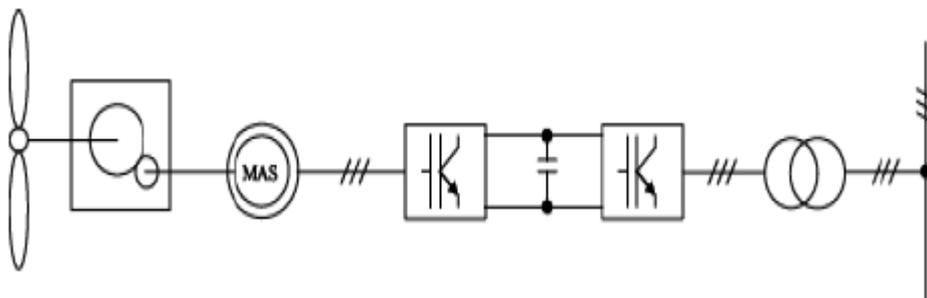


Figure I-20: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

I.9.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) (rotor bobiné) :

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. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « Machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques est égale à 9 fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et d'un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée. Les différents modes de fonctionnement de la MADA [18][19].

I.9.3 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure I.22, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [10] [20] [18].

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

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 [12] [10] [11].

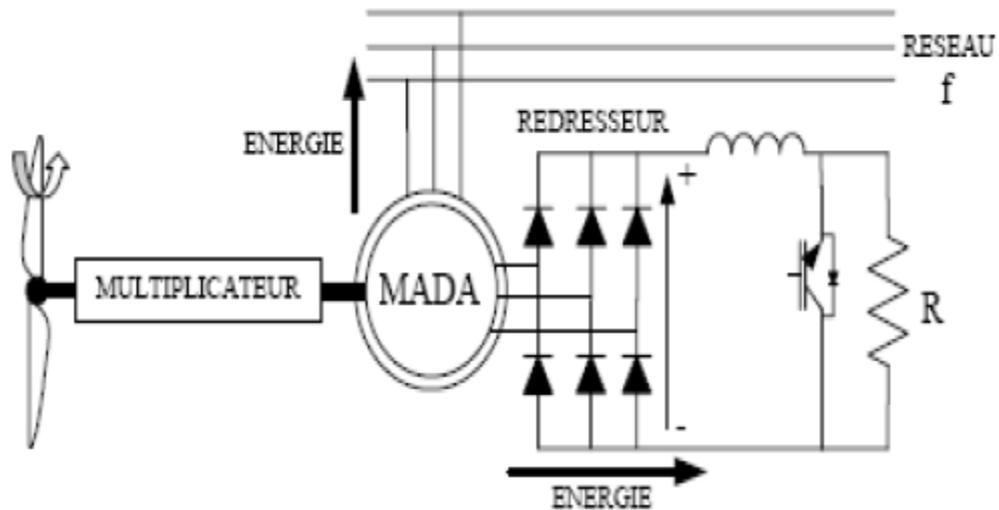


Figure I-22: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

I.9.4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent le hacheur et la résistance sont remplacées par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure I.23) [21].

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine [21].

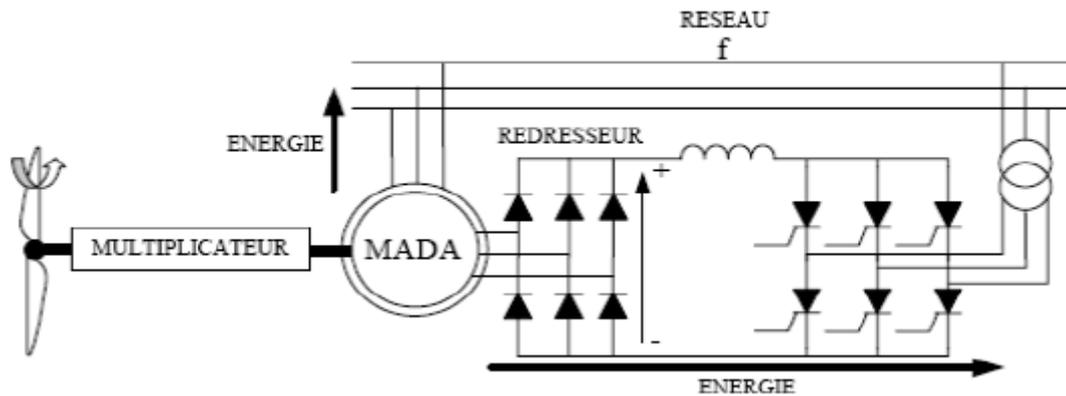


Figure I-23: MADA structure Kramer

Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance ; de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT.

I.9.5 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo-convertisseur (Figure I.24), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [22].

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la figure. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone) [22].

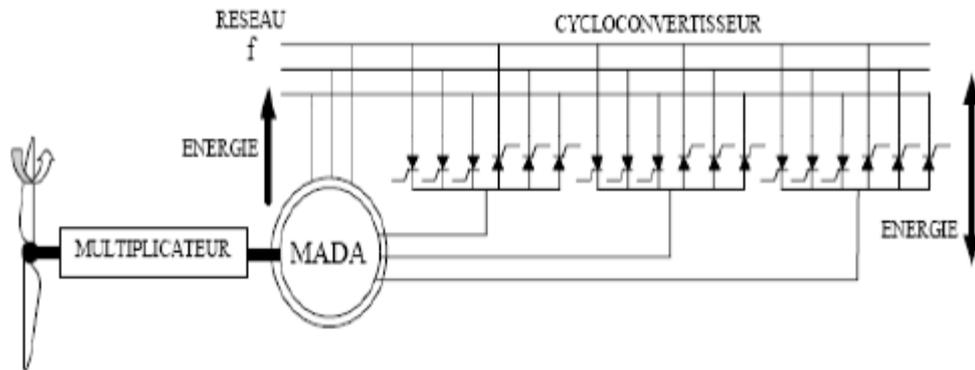


Figure I-24: Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

Le principe du cyclo-convertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (Figure I.25).

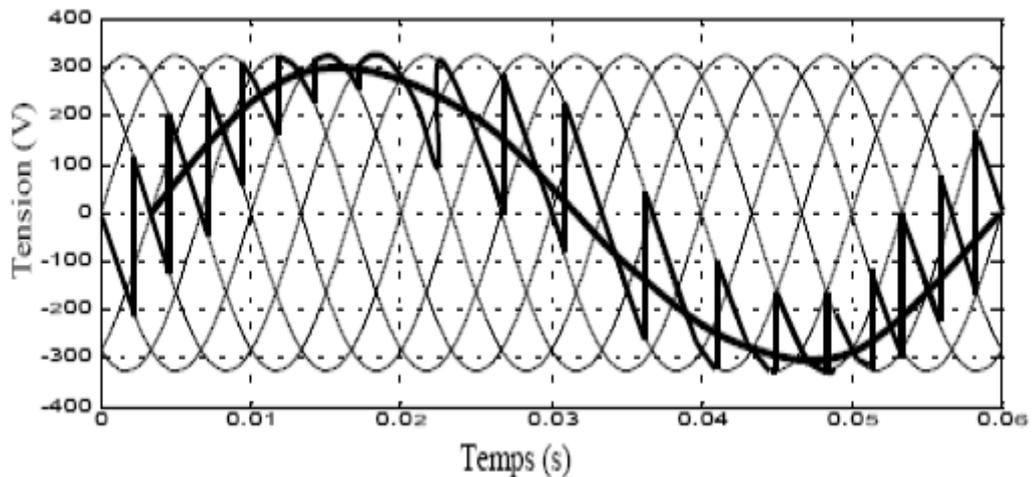


Figure I-25: Principe de fonctionnement du cyclo-convertisseur

Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo-convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

I.9.6 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Cette configuration (Figure I.26) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. [19]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées) [20].

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à celle de la MADA de type "brushless». Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor). Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau [20].

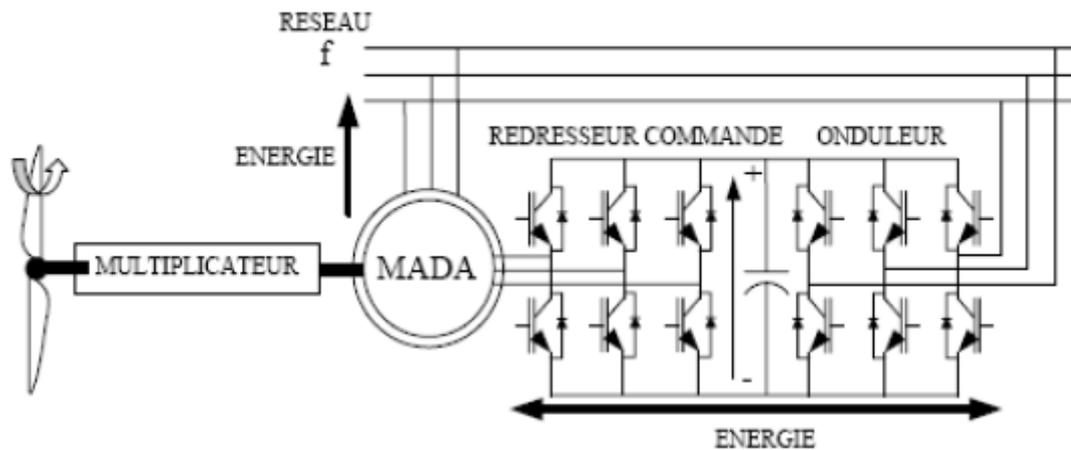


Figure I-26: Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevées dans ces mêmes enroulements.

I.10 Conclusion

Les éoliennes à vitesse fixe permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs. Les éoliennes à vitesse variables offrent plus de possibilités de réglage, mais ont un coût plus élevé. L'éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation offre des capacités qui pourraient lui faire permettre de participer aux réglages du réseau avec une commande bien adaptée. Ce type d'éolienne est à la base de ce travail.

Dans ce chapitre, on a présenté l'état de l'art du système éolien, en premier lieu, un historique d'utilisation de l'énergie éolienne et l'exploitation du vent par l'homme. Après, on a discuté les parties essentiels d'un système éolien, les différents types d'éolienne les plus utilisés et les avantages et les inconvénients de ce système. En outre, nous avons présenté aussi la capacité éolienne dans le monde et l'Algérie en générale. A la fin de ce chapitre, nous avons fait une description des machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne et le raccordement aux réseaux électriques. Le deuxième chapitre sera consacré pour la présentation et la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA et de la turbine éolienne.

II. Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation

Résumé :

Ce chapitre traite la modélisation et de la commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA. Dans un premier temps, les modèles aérodynamique, mécanique et électrique de la chaîne de conversion électromécanique y sont présentés et examinés. Ensuite, les différentes commandes permettant de contrôler indépendamment les puissances actives sont examinées.

II.1 Introduction

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : celle à axe vertical et celle à axe horizontal. Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation.

Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Ces dernières sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie électrique sur le réseau électrique. En effet, les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées.

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

Cette machine date de l'année 1899, la (MADA) est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes d'instabilités rencontrés

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

dès lors l'ont fait abandonner pour un temps. Grâce au progrès des technologies diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle du flux des puissances pour les régimes caractéristiques hypo et hyper synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. Dans ce contexte, la théorie de l'orientation du flux, apparue dans le début des années 70, appliquée à la MADA avec succès a donné lieu à un outil puissant pour son contrôle.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation d'une éolienne à base de la MADA. D'abord, la structure de la MADA et ces modes de fonctionnement seront détaillées. Puis on décrit le modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation dans le plan $\alpha\beta$. Ensuite, on passe au modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan DQ qui contient la transformation de Park. Enfin, nous avons implémenté le système complet sur le logiciel MATLAB Simulink afin de pouvoir le simuler. .

II.2 Présentation De la MADA :

II.2.1 Structure de la machine et configuration électrique

La machine à induction à double alimentation (MADA) ou la machine à induction à rotor bobiné (MIRB) sont des termes couramment utilisé pour décrire une machine électrique, qui a été utilisée pendant de nombreuses décennies dans divers applications, souvent dans la gamme des mégawatts de puissance et aussi moins souvent dans la gamme d'un quelques kilowatts. Ce concept de machine est une alternative aux plus courants asynchrone et machines synchrones. Il peut être avantageux dans les applications qui ont une plage de vitesse limitée, permettant une réduction de la taille du convertisseur électronique de puissance d'alimentation comme, par exemple, dans la vitesse variable génération, pompage de l'eau et ainsi de suite.

La configuration d'alimentation typique de la MADA dans une éolienne est illustrée à la (Figure II.1). Le stator est alimenté par tensions triphasées directement du réseau à amplitude

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

et fréquence constantes, créant le champ magnétique du stator [24][25]. Le rotor est également alimenté par des tensions triphasées qui prennent une amplitude différente et fréquence en régime établi afin d'atteindre différentes conditions de fonctionnement de la machine (vitesse, couple, etc.). Ceci est réalisé en utilisant un convertisseur triphasé dos à dos, comme représenté dans le simple schématisé sur la figure. Ce convertisseur, avec la stratégie de contrôle appropriée, est en charge d'imposer les tensions alternatives du rotor requises pour contrôler le point de fonctionnement global du MADA et effectuer les échanges de puissance à travers le rotor vers le réseau. Bien qu'un convertisseur de source de tension soit illustré, différentes configurations ou des topologies de convertisseur pourraient être utilisées. Plus de détails sur le fonctionnement de la machine sont décrits dans les sections suivantes.

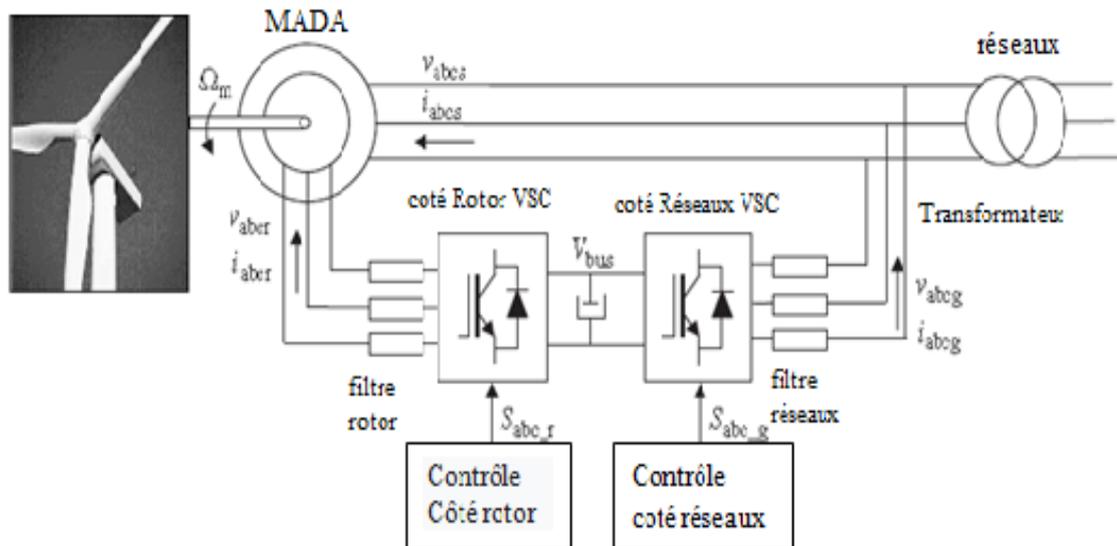


Figure II-1: Configuration générale de l'alimentation du système

I.3 Mode de fonctionnement de la MADA

La MADA présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil, elle fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. C'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur[26]. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable.

II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

- La puissance P_s est fournie par le réseau au stator de la MADA.
- La vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme.
- La puissance de glissement P_r transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau (Figure II.2).

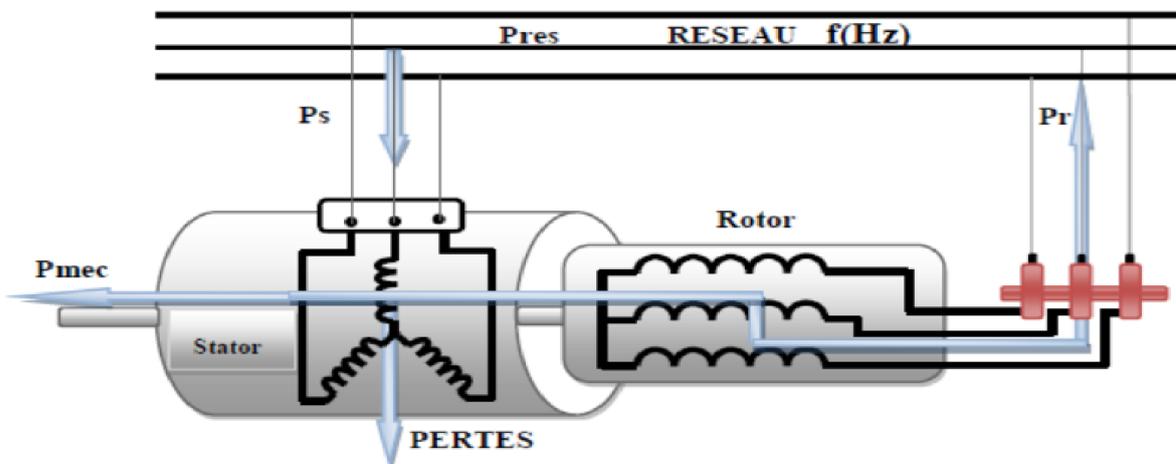


Figure II-2: Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

- Le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA.
- La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator (figure II.3).

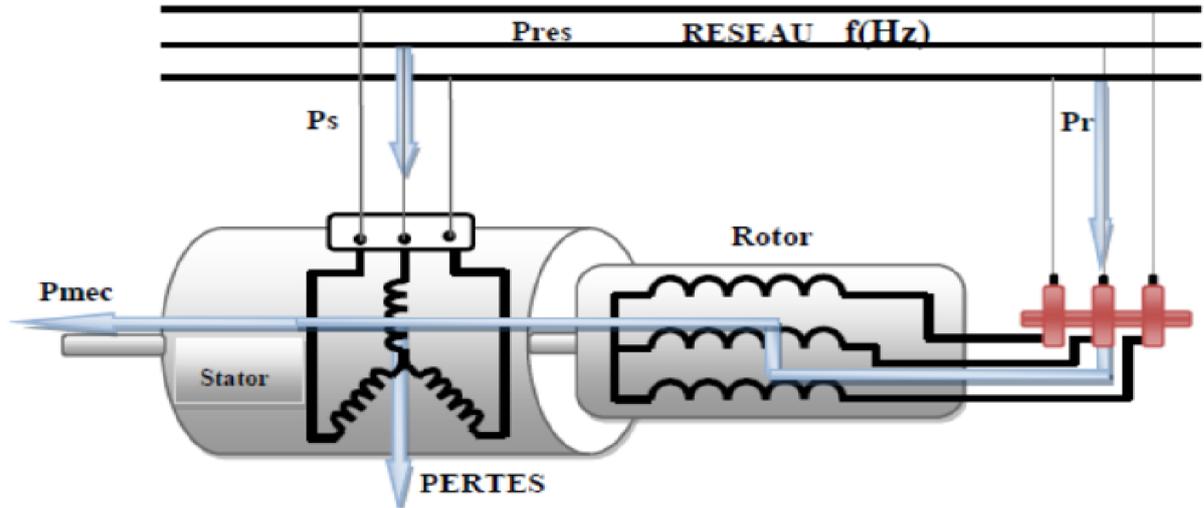


Figure II-3: Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

II.3.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone

- La turbine fournit une puissance mécanique P_{mec} à la machine.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor (Figure II.4).

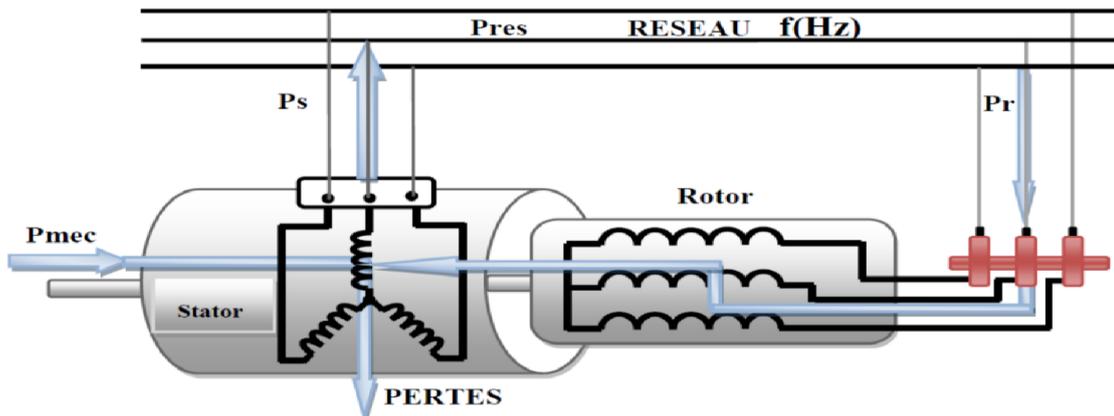


Figure II-4: Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone

II.3.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone

- La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près.
- Une partie de cette puissance correspondant à $g/(1-g) P_{mec}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor (Figure II.5).

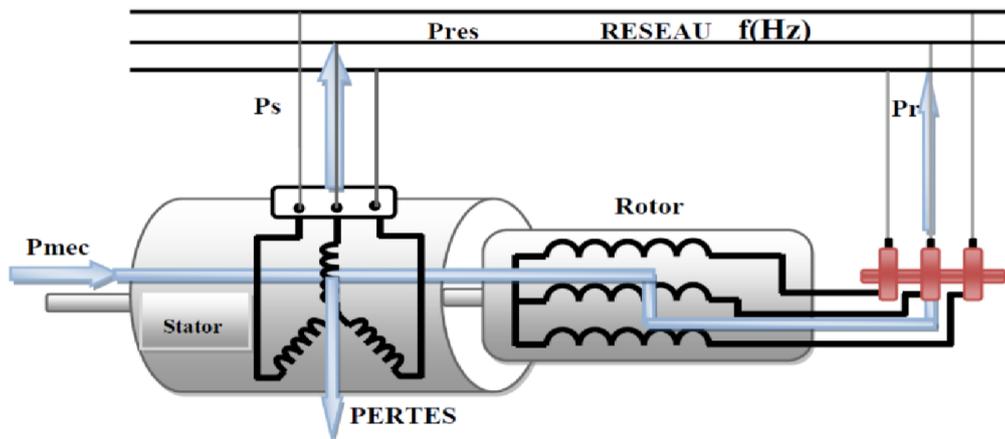


Figure II-5: Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

II.4 Modélisation de la MADA

La modélisation des machines électriques consiste en l'élaboration des modèles mathématiques qui permettent de simuler le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.

II.4.1 Hypothèses simplificatrices

- L'entrefer est considéré constant.
- L'effet des encoches est négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements[23] .

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

La figure (II.6) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique, où l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase.

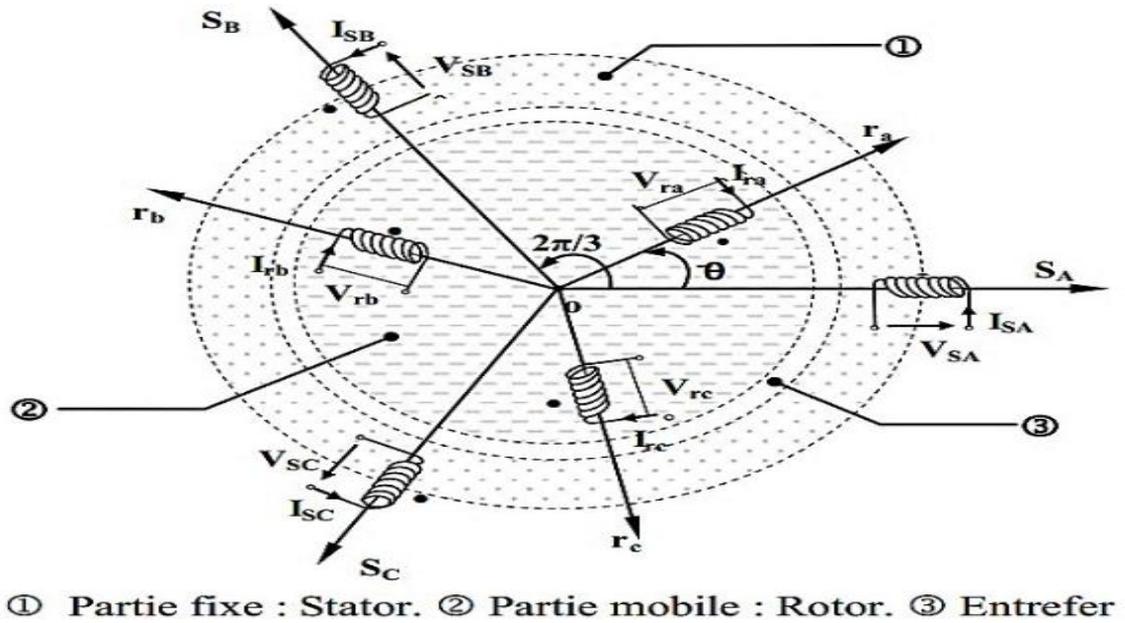


Figure II-6: Représentation simplifiée de la MADA

I.4.2 Modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation dans le plan $\alpha\beta$:

En développant le modèle $\alpha\beta$ dynamique du MADA, la théorie des vecteurs spatiaux est appliquée aux équations de la machine et encore, comme dans le modèle stationnaire qui a été considéré, la machine est supposé à la fois idéale et linéaire. La figure (II.7) montre les trois différents référentiels tournants généralement utilisé pour développer des modèles vectoriels spatiaux du MADA. Le référentiel statorique ($\alpha-\beta$) est un référentiel stationnaire, le référentiel rotorique (DQ) tourne à ω_m et le référentiel synchrone le repère (dq) tourne à s . Les indices « s », « r » et « a » sont utilisés pour indiquer qu'un vecteur d'espace est de référence aux référentiels stators, rotor et synchrone, respectivement. En utilisant la rotation directe et inverse, un vecteur spatial peut être représenté dans n'importe lequel de ces cadres [24].

Par conséquent, les trois bobines du stator et du rotor séparément, en utilisant la théorie des vecteurs spatiaux, peuvent être représentées par deux bobines $\alpha\beta$ fixes pour le stator et deux bobines tournantes DQ pour le rotor, assurant les équations de tension suivantes :

$$\vec{v}_s^s = R_s \cdot \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \quad (II.1)$$

$$\vec{v}_r^r = R_r \cdot \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\psi}_r^r}{dt}$$

Si les deux équations de tension sont représentées dans le référentiel stationnaire $\alpha\beta$, alors l'équation du rotor doit être multipliée par $e^{j\theta_m}$, ce qui donne l'ensemble d'équations suivant :

$$\vec{v}_s^s = R_s \cdot \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \Rightarrow \begin{cases} v_{\alpha s} = R_s \cdot i_{\alpha s} + \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} \\ v_{\beta s} = R_s \cdot i_{\beta s} + \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} \end{cases} \quad (II.2)$$

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

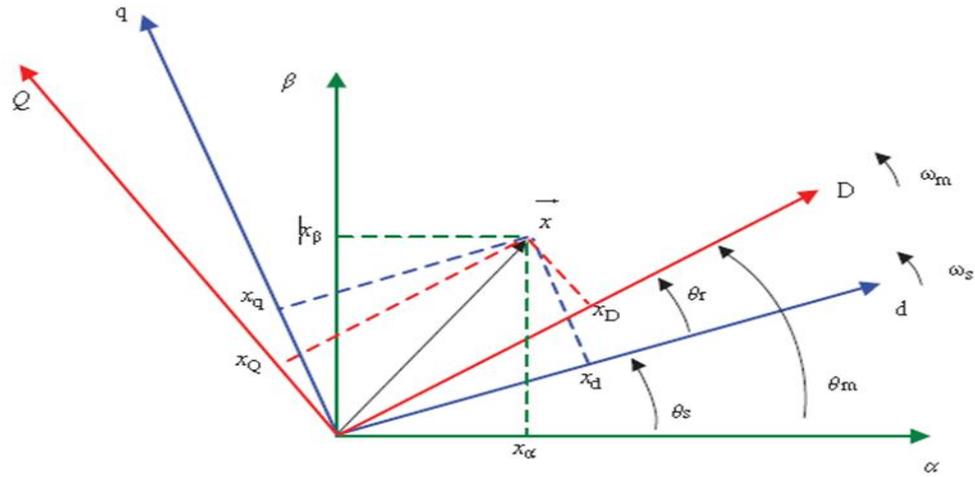


Figure II-7: Différents référentiels pour représenter les vecteurs spatiaux du MADA

$$\vec{v}_r^s = R_r \cdot \vec{i}_r^s + \frac{d\psi_r^s}{dt} - j\omega_m \cdot \vec{\psi}_r^s \quad \Rightarrow \begin{cases} v_{ar} = R_r \cdot i_{ar} + \frac{d\psi_{ar}}{dt} + \omega_m \psi_{\beta r} \\ v_{\beta r} = R_r \cdot i_{\beta r} + \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} + \omega_m \psi_{\alpha r} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

De la même manière, il est possible de dériver les expressions de flux statorique et rotorique sous forme de vecteur spatial dans un référentiel stationnaire :

$$\vec{\psi}_s^s = L_s \cdot \vec{i}_s^s + L_m \cdot \vec{i}_r^s \quad \Rightarrow \begin{cases} \psi_{\alpha s} = L_s \cdot i_{\alpha s} + L_m \cdot i_{\alpha r} \\ \psi_{\beta s} = L_s \cdot i_{\beta s} + L_m \cdot i_{\beta r} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

$$\vec{\psi}_r^s = L_m \cdot \vec{i}_s^s + L_r \cdot \vec{i}_r^s \quad \Rightarrow \begin{cases} \psi_{\alpha r} = L_m \cdot i_{\alpha s} + L_r \cdot i_{\alpha r} \\ \psi_{\beta r} = L_m \cdot i_{\beta s} + L_r \cdot i_{\beta r} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Par conséquent, à partir de l'ensemble des équations dérivées, le circuit équivalent est développé comme représenté dans la figure (II.8). Il existe un circuit équivalent pour chaque coordonnée, dans lequel toutes les tensions, courants et les amplitudes de flux sont sinusoïdales avec une fréquence de ω_s . D'autre part, les puissances actives et réactives des côtés stator et rotor peuvent être calculées en fonction aux équations suivantes :

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{\alpha s} i_{\alpha s} + v_{\beta s} i_{\beta s}) \quad Q_s = \frac{3}{2} (v_{\beta s} i_{\alpha s} + v_{\alpha s} i_{\beta s}) \quad (\text{II.6})$$

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

$$P_r = \frac{3}{2} (v_{\alpha r} i_{\alpha r} + v_{\beta r} i_{\beta r}) Q_r = \frac{3}{2} (v_{\beta r} i_{\alpha r} + v_{\alpha r} i_{\beta r}) \quad (\text{II. 7})$$

Alors que le couple électromagnétique (T_{em}), créé par le MADA, peut être calculé par l'équation suivant:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \text{Im}\{\vec{\psi}_r \vec{i}_r^*\} = \frac{3}{2} p (\psi_{\beta r} i_{\alpha r} - \psi_{\alpha r} i_{\beta r}) \quad (\text{II.8})$$

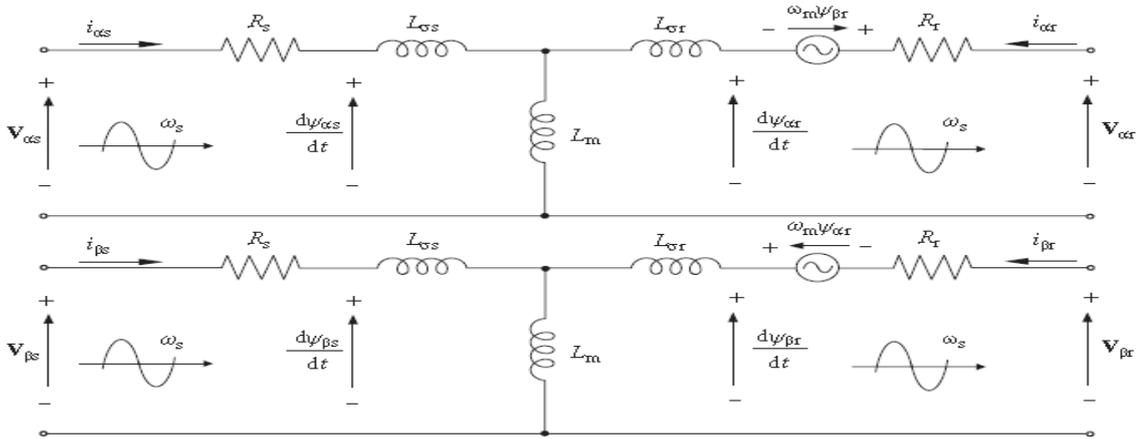


Figure II-8:Modèle du MADA dans le référentiel

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \text{Im}\{\vec{\psi}_s \vec{i}_r^*\} = \frac{3}{2} p \text{Im}(\vec{\psi}_s^* \vec{i}_s) = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} p \text{Im}\{\vec{\psi}_r^* \vec{i}_s\} \\ &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} p \text{Im}\{\vec{\psi}_r^* \vec{\psi}_s\} = \frac{3}{2} L_m p \text{Im}(\vec{i}_s \vec{i}_r^*) \quad (\text{II.9}) \end{aligned}$$

Ou encore $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$

Ainsi, en réarrangeant les expressions (II.2) – (II.5), nous pouvons développer plusieurs représentations de l'espace d'état du MADA, dans le but de simuler ou d'analyser. L'expression

s

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

uivante montre l'un d'entre eux dans lequel le vecteur espace-état est composé des flux statorique et rotorique :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \overrightarrow{\Psi}_s \\ \overrightarrow{\Psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{-R_s}{\sigma L_r} + j\omega_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overrightarrow{\Psi}_s \\ \overrightarrow{\Psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overrightarrow{V}_s \\ \overrightarrow{V}_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Par conséquent, en ajoutant l'équation du mouvement mécanique qui décrit le comportement de la vitesse du rotor :

$$T_{em} - T_{load} = j \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (\text{II.11})$$

Avec J, l'inertie du rotor et T_{load} , le couple résistant appliqué à l'arbre, nous avons constitué un modèle de la MADA qui peut également être utilisé la simulation.

II.4.3 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le planDQ :

Le modèle vectoriel spatial du MADA peut également être représenté dans un référentiel à rotation synchrone, en multipliant les expressions de tension (II.1) par $e^{-j\theta_s}$ et $e^{-j\theta_r}$, respectivement, on obtient les équations de tensiondq :

$$\overrightarrow{v}_s^{\partial} = R_r \cdot \overrightarrow{i}_s^{\partial} + \frac{d\overrightarrow{\psi}_s^{\partial}}{dt} + j\omega_s \cdot \overrightarrow{\psi}_s^{\partial} \quad \Rightarrow \begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{dr} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

$$\overrightarrow{v}_r^{\partial} = R_r \cdot \overrightarrow{i}_r^{\partial} + \frac{d\overrightarrow{\psi}_r^{\partial}}{dt} + j\omega_r \cdot \overrightarrow{\psi}_r^{\partial} \quad \Rightarrow \begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

De même, les flux donnent :

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

$$\vec{\psi}_s^{\partial} = L_s \cdot \vec{i}_s^{\partial} + L_m \cdot \vec{i}_r^{\partial} \quad \Rightarrow \begin{cases} \psi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

$$\vec{\psi}_r^{\partial} = L_m \cdot \vec{i}_s^{\partial} + L_r \cdot \vec{i}_r^{\partial} \quad \Rightarrow \begin{cases} \psi_{dr} = L_m \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dr} \\ \psi_{qr} = L_m \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Par conséquent, à partir des équations ci-dessus, le circuit électrique équivalent sur le plan dq est obtenu, comme illustré (la figure II.9). Cependant, cette représentation du modèle avec des expressions équivalentes de puissance et de couple comme dans le modèle $\alpha\beta$, peuvent être développées davantage.

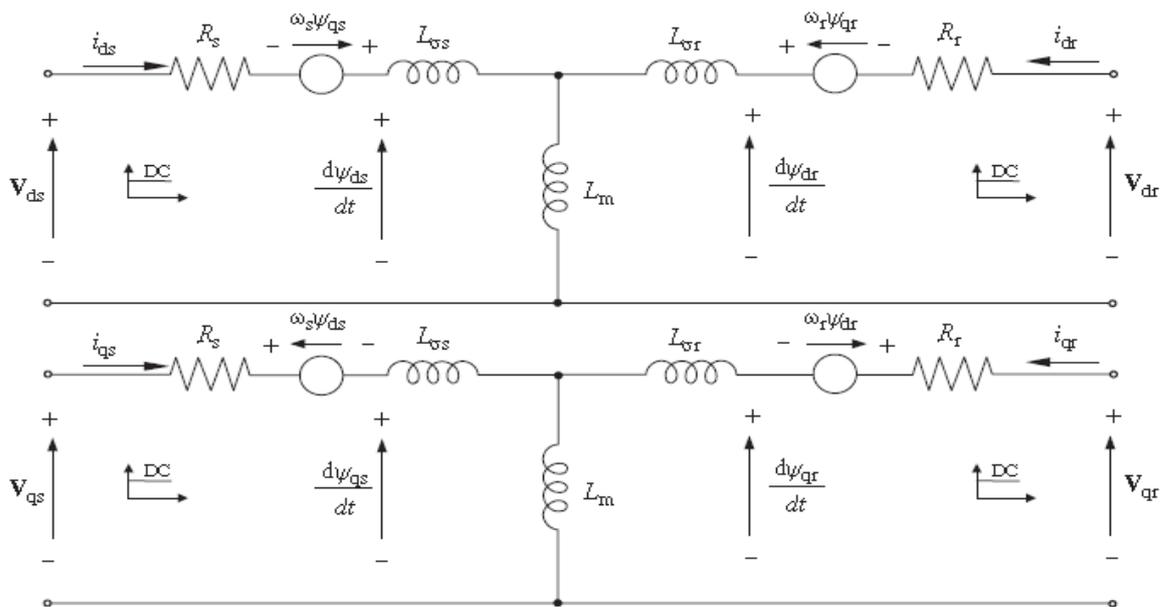


Figure II-9:Modèle du MADA dans le référentiel dq

II.5 La commande vectorielle de la MADA :

II.5.1 Définition :

La commande vectorielle, aussi appelée commande à flux orienté (*field-oriented control* en anglais), est une méthode de commande des variateurs de vitesse électrique dans laquelle les courants statoriques triphasés d'un moteur électrique à courants alternatifs sont transformés en

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

deux composantes orthogonales qui peuvent être considérées comme étant des vecteurs. Le premier vecteur permet le réglage du flux magnétique du moteur, tandis que la seconde règle le couple. Ils sont alors découplés et le fonctionnement devient alors similaire à celui d'un moteur à courant continu.

Le calculateur calcule alors à partir de la consigne de vitesse du moteur, le flux et le couple nécessaire, desquels on déduit les courants requis. Typiquement, un régulateur PI sert à maintenir le courant à la valeur demandée. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) gère ensuite la commutation des transistors du variateur de vitesse électrique en fonction de la consigne de tension qui lui parvient. Un régulateur PI est placé après les consignes de courant afin de stabiliser l'ensemble.

La commande vectorielle est utilisée pour les machines synchrones et asynchrones, ainsi que pour les onduleurs en général, par exemple dans le cas des installations haute tension à courant continu. Elle a été conçue au départ pour des applications demandant de bonnes performances de la part du moteur : fonctionnement régulier sur toute la plage de vitesse, couple maximal à vitesse nulle, bonnes performances dynamiques combinés à des accélérations et décélérations rapide. La technique s'est toutefois démocratisée car elle permet également de réduire la taille du moteur utilisé dans un système (nouveaux moteur "brushless"), et donc son coût, ainsi que sa consommation électrique [25].

II.5.2 Principe de la commande vectorielle :

Le concept d'orientation de flux, proposé par Hasse en 1969 et Blaschke en 1972, constitue sans doute le plus important de paradigme dans la théorie et la pratique de contrôle des machines à induction. En effet, l'objectif de l'orientation du flux est de rendre le moteur à induction semblable à un moteur à courant continu à excitation séparée, ce qui permet le contrôle optimal du couple électromagnétique indépendamment du flux.

Le principe de cette commande est similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée ; à savoir le contrôle indépendamment des puissances active et réactive

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

générées au stator de la machine. La puissance active dépend uniquement du courant rotorique i_{qr} , et la puissance réactive dépend uniquement du courant i_{dr} , pour cela nous l'avons maintenu à 0 pour négliger la puissance réactive (Figure II.10)[26].

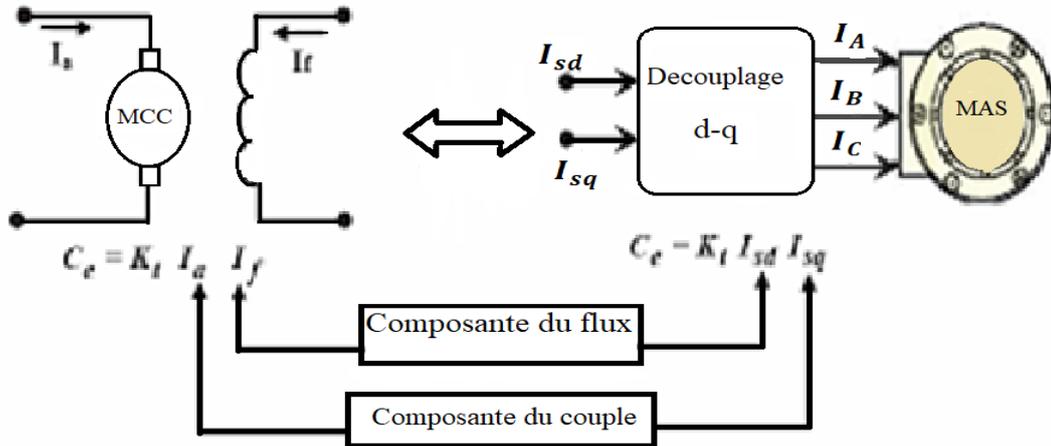


Figure II-10: Principe de la commande vectorielle.

II.5.4 Avantage et inconvénient :

Avantage :

La commande vectorielle a les avantages suivants :

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique)
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase

Inconvénients :

Elle a également certains inconvénients :

- Coûteuse (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP.). Le processeur doit être capable de calculer l'algorithme environ toutes les millisecondes.

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique.
- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle θ_s estimé.
- La vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances du variateur.
- De mauvais paramètres entraînent une erreur sur le couple.

II.6 Contrôle vectoriel de MADA :

II.6.1 Fonctionnement de la connexion au réseau :

Cette section décrit le contrôle du MADA. Il est nécessaire de distinguer deux scénarios différents : l'opération de raccordement au réseau et l'opération autonome. Les deux configurations ont des différences de contrôle qui seront décrites. Cependant, seule la commande du convertisseur côté rotor est étudiée dans cette section.

II.6.2 Boucles de contrôle du courant du rotor :

Parmi les différentes méthodes alternatives qui ont été développées pour le MADA, seul le vecteur technique de contrôle est étudié dans cette section, qui est probablement la plus étendue et la plus établie. Pour une meilleure compréhension, le contrôle est décrit en différentes étapes : d'abord, en étudiant les boucles de contrôle de courant. De manière équivalente aux techniques classiques de contrôle vectoriel [27][28] d'autres machines différentes, le contrôle vectoriel du MADA est effectué dans un cadre dq à rotation synchrone, dans lequel l'axe d est aligné, dans ce cas, avec le vecteur espace flux statorique, comme illustré sur la figure (II.11) [29][30]. En raison de ce choix d'alignement, on montrera

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

plus loin que le courant continu rotorique est proportionnel au stator et que le courant rotorique en quadrature est proportionnel au couple ou à la puissance statorique active. Par conséquent, du modèle de la (MADA) dans un référentiel synchrone, en substituant les équations (II.16) et (II.14) dans l'équation de la tension rotorique (II.15), on obtient la tension rotorique en fonction du rotor courants et flux statoriques (notez que $\psi_{qs} = 0$) :

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} |\vec{\psi}_s| \quad (\text{II.16})$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} - \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} |\vec{\psi}_s|$$

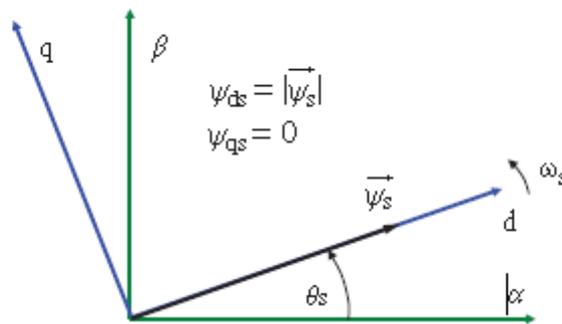


Figure II-11: Référentiel dq rotatif synchrone aligné avec le vecteur spatial de flux statorique

D'après l'équation (II.2), par exemple, en supposant que la chute de tension dans la résistance du stator est faible, le flux statorique est constant car le stator est connecté directement au réseau à tension alternative constante ; par conséquent, le terme $d|\psi_{qs}|/dt$ vaut zéro. Ces deux dernières équations révèlent qu'il est possible d'effectuer dq contrôle des courants rotoriques, simplement en utilisant un régulateur pour chaque composant de courant, comme illustré à la Figure (II.11). Les termes croisés de l'équation (II.6) peuvent être inclus à la sortie de chaque régulateur afin d'aider le régulateur. A noter que le flux statorique et ω_r doivent être estimés à cet effet ; cependant, c'est simple et n'ajoute pas de difficultés supplémentaires. Pour la transformation du référentiel, l'angle θ_r doit être estimé. Le contrôle doit être effectué en coordonnées dq, mais ensuite la tension et les courants du rotor doivent

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

être transformés dans les coordonnées DQ. Tout d'abord, il est possible d'obtenir l'angle du vecteur spatial de tension du stator, puis de soustraire 90° à partir de cet angle estimé, et ainsi, obtenir θ_s . Une simple boucle à verrouillage de phase (PLL) peut être utilisée pour effectuer la synchronisation du réseau de tension statorique, offrant une robustesse à l'estimation et une réjection de petites perturbations ou harmoniques.

Dans les sections suivantes, des détails supplémentaires sont fournis sur la façon dont les références courantes sont générées. Notez que si la MADA utilisée présente un rapport de rotation différent au stator et le rotor, il faut en tenir compte au stade du contrôle.

Dans le schéma fonctionnel de contrôle présenté sur la figure (II.12), les boucles de courant fonctionnent avec les courants rotoriques rapportés du côté stator, tandis que la conversion en grandeurs rotoriques est effectuée à l'étape de mesure des courants et avant la création des impulsions pour le convertisseur des tensions.

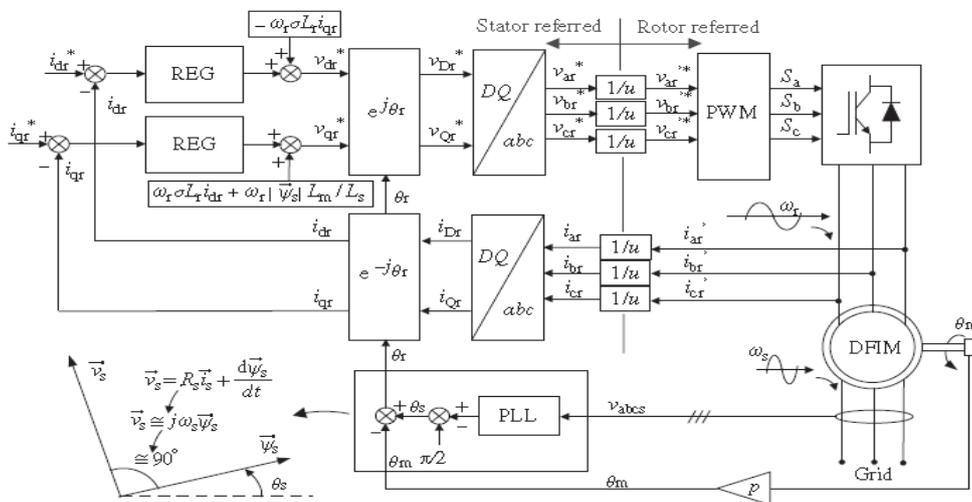


Figure II-13: Boucles de régulation de courant du MADA.

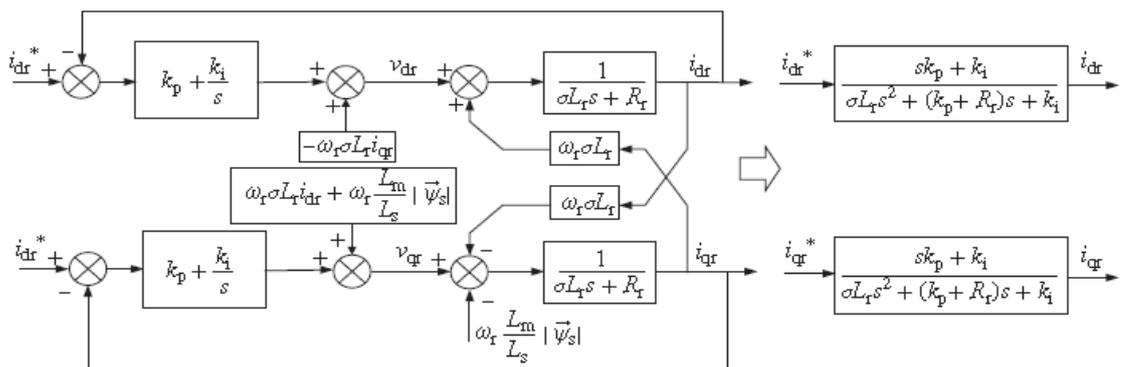


Figure II-12: Système équivalent de second ordre de contrôle de courant en boucle fermée avec régulateurs PI

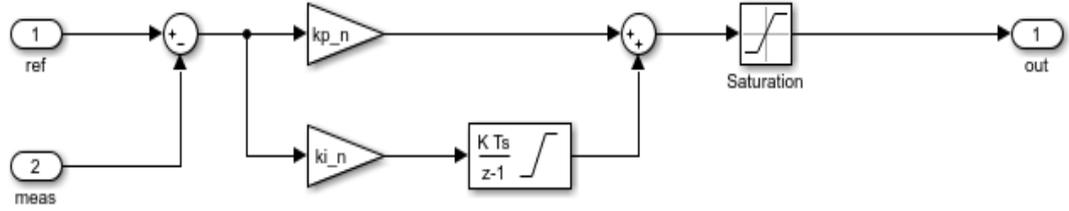


Figure II-14: Schéma bloc du régulateur PI par Matlab Simulink

II.6.3 Boucles de contrôle de la puissance et de la vitesse :

Une fois les boucles de régulation de courant et le calcul de l'angle de flux sont étudiés, le contrôle complet du système peut être introduit. Comme l'axe « d » du cadre de référence est aligné avec l'espace de flux du stator vecteur, l'expression du couple dans le cadre dq peut être simplifiée comme suit :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\psi_{qs} i_{dr} - \psi_{ds} i_{qr}) \Rightarrow T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} |\vec{\psi}_s| i_{qr} \Rightarrow T_{em} = K_T i_{qr} \quad (II. 17)$$

Cela signifie que la composante de courant du rotor « q » est proportionnelle au couple, c'est-à-dire qu'avec i_{qr} , il est possible de contrôler le couple et, par conséquent, la vitesse de la machine si l'application l'exige. De la même façon, en développant l'expression de la puissance réactive du stator dans le repère dq, on obtient une expression simplifiée, ce qui révèle que i_{dr} est responsable de Q_s .

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \Rightarrow Q_s = \frac{3}{2} \omega_s \frac{L_m}{L_s} |\vec{\psi}_s| \left(i_{ds} - \frac{|\vec{\psi}_s|}{L_m} \right) \Rightarrow Q_s = K_Q \left(i_{dr} - \frac{|\vec{\psi}_s|}{L_m} \right) \quad (II. 18)$$

Par conséquent, on peut voir que les deux composantes du courant du rotor indépendamment permettent de contrôler le couple et la puissance réactive du stator. Ainsi, à

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

Partir de ces expressions, La figure (II.15) et (II.16) illustre le contrôle vectoriel complet du MADA. Maintien des boucles de courant étudiées dans les sections précédentes (Figure II.12), une boucle de vitesse et une boucle de puissance réactive stator ont été ajoutées. La nécessité de la régulation de la vitesse de notre système éolien dépend de l'application dans laquelle cette machine est utilisée, et il pourrait arriver que le MADA impose simplement un couple électromagnétique T_{em} , tandis que la vitesse de l'arbre est contrôlée par d'autres éléments.

Cependant, avec la boucle Q_s , il est possible de contrôler la magnétisation de la machine. Tel que discuté avant, parce que le stator de la machine est connecté directement au réseau, l'amplitude du flux statorique est constante et fournie par la tension du réseau :

$$|\psi_s| = |V_s| / \omega_s$$

, ainsi les équations du flux statorique révèlent que :

$$\overrightarrow{|\psi_s|} = \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \psi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (II.19)$$

Le niveau de flux statorique $|\psi_s|$ doit être créé en choisissant i_{ds} et i_{dr} , distribuant ainsi le montant requis de courant entre le rotor et le stator. Notez que i_{qs} et i_{qr} sont fixés par le couple et, par conséquent, il n'y a pas de possibilité de choisir ; cependant, selon le Q_s réglé, il est possible d'échanger plus grand ou plus bas courants statorique et rotorique. A titre d'exemple, dans les applications de production d'énergie éolienne, différentes valeurs Q_s pourraient être exigées en fonction des exigences du réseau et donc, dans un tel cas, la référence Q_s serait fixée directement par le gestionnaire du réseau. D'autre part, comme pour les boucles de courant,

Alternativement, si l'application le permet, il est typique de régler le courant rotor i_{dr} à zéro (éliminant la boucle Q_s), en minimisant le courant rotorique nécessaire et sauver le dimensionnement de la conception des enroulements du rotor et du convertisseur côté rotor. Évidemment, c'est obtenu en augmentant le dimensionnement du bobinage du stator.

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

Fonctionnant à couple constant en mode moteur. La tension statorique est maintenue constante grâce à la connexion au réseau, tandis que les courants statoriques sont également constants car T_{em} et Q_s sont maintenus constants. La rampe de vitesse effectuée au milieu de l'expérience provoque la variation de la tension rotorique et les courants, ce qui donne une variation des puissances réactive du rotor.

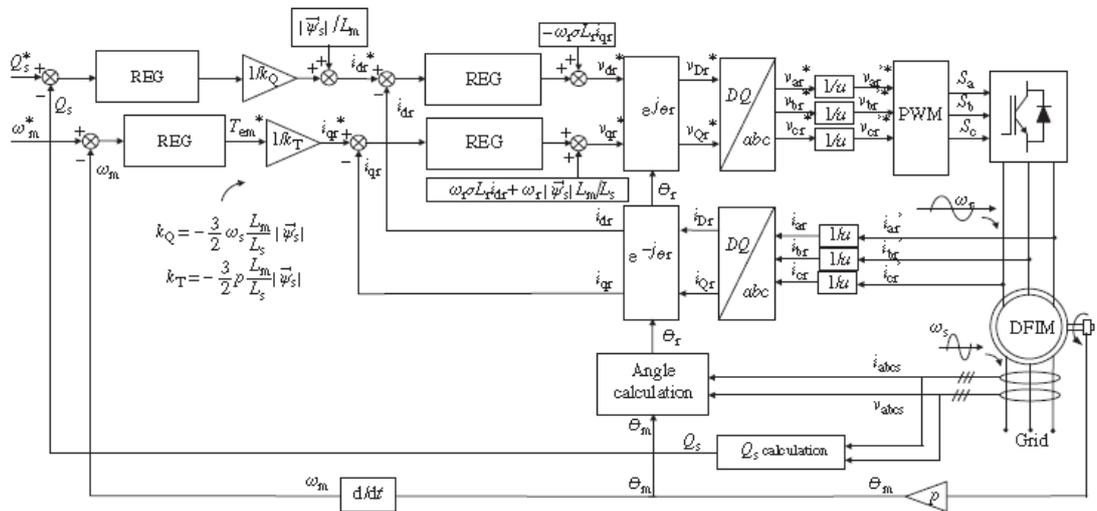


Figure II-15: Contrôle vectoriel complet du système

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

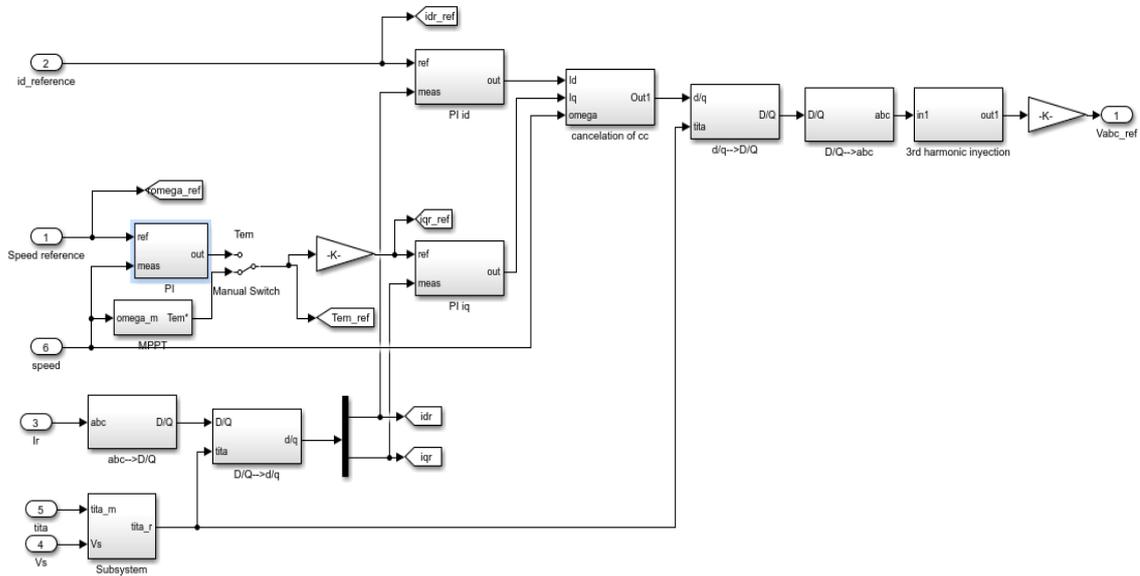


Figure II-16: Contrôle vectoriel complet du système développé sur MATLAB Simulink

II.7 Modélisation de l'éolienne

Le système éolien a pour but de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie ; mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Ce système, dans notre cas, est constitué mécaniquement de quatre organes :

- Trois pales orientables possédant des coefficients propres d'inertie, d'élasticité et de frottement par rapport à l'air et par rapport au support de la turbine ;
- Un arbre d'entraînement des pales avec sa propre inertie, sa propre élasticité et son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur ;
- Un multiplicateur de vitesse, de gain G ;
- Un rotor de génératrice possédant une inertie Je et un coefficient de frottement De

II.7.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement ;
- Les coefficients des frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés ;
- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

On obtient alors un modèle mécanique simple :

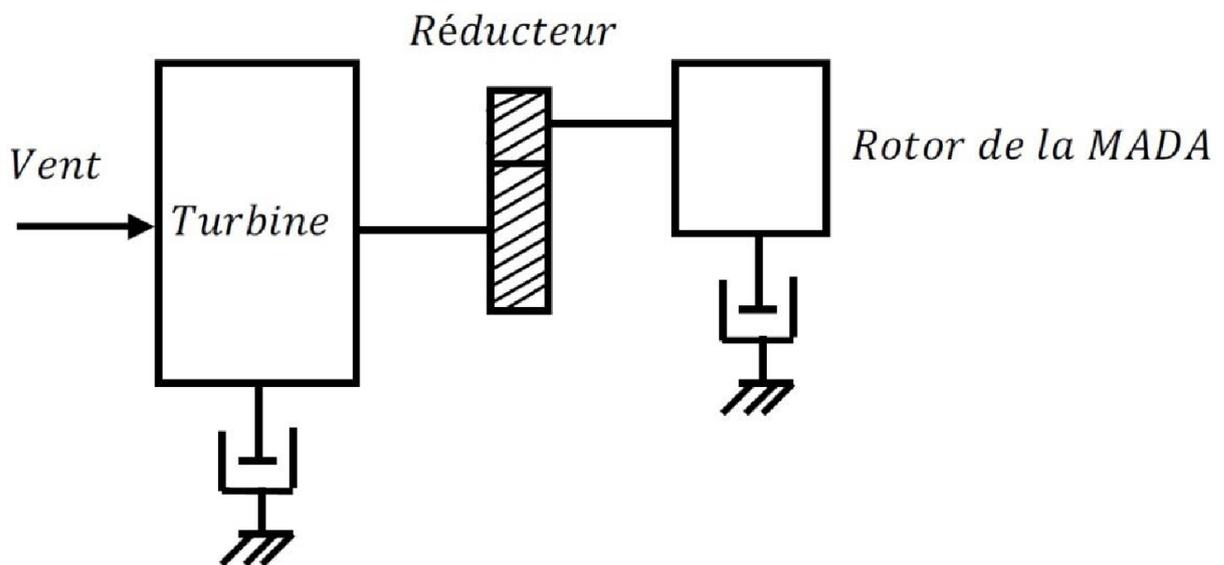


Figure II-17: Modèle mécanique simplifié de la turbine.

II.7.2 Modélisation de la turbine :

La théorie du disque actionneur explique de manière très simple le processus d'extraction de l'énergie cinétique du vent, basé sur des bilans énergétiques et l'application de l'équation de Bernoulli. Le Rotor captant l'énergie est considéré comme un disque poreux, ce qui provoque une diminution de la quantité de mouvement du flux d'air, entraînant un saut de pression dans les faces du disque et une déviation des écoulements vers l'aval (figure II.18).

La théorie de la conservation de la quantité de mouvement est utilisée pour étudier le comportement de l'éolienne et pour faire certaines hypothèses

Quisont :

- l'air est incompressible,
- le fluide le mouvement est stationnaire,
- Les variables étudiées ont la même valeur sur une section donnée du tube de courant d'air.

La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique dans le vent traversant à une vitesse V_v , surface A_1 , s'exprime par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A_1 V_v^3 \quad (\text{II. 20})$$

Où ρ est la densité de l'air.

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de cette puissance :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p \quad (\text{II. 21})$$

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

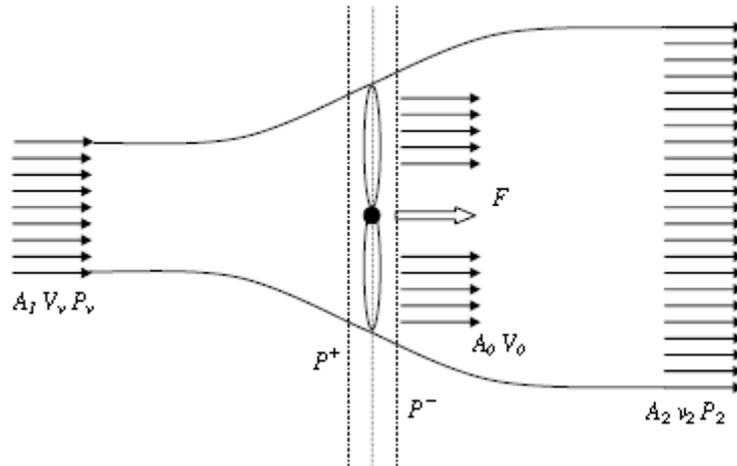


Figure II-18:Schéma de l'écoulement d'air à travers une éolienne.

Où R est le rayon du cercle formé par les pales d'éolienne et C_p est le coefficient de puissance, paramètre sans dimension qui exprime l'efficacité de l'éolienne dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Pour une éolienne donnée, ce coefficient est donné en fonction de la vitesse du vent, la vitesse de rotation de l'éolienne et son angle d'inclinaison.

C_p est souvent donné en fonction du rapport de vitesse de pointe, λ , défini par :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{V_v} \quad (\text{II.22})$$

Où R est la longueur des pales (rayon du rotor de turbine) et Ω_t est l'angle de la vitesse du rotor. La valeur maximale théorique de C_p est donnée par la limite de Betz :

$$C_{p_{theo_max}} = 0,593 = 59,3\%$$

Le couple rotorique est obtenu à partir de la puissance reçue et de la vitesse de rotation de la turbine :

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\rho\pi R^2 V_v^3}{2\Omega_t} C_p = \frac{\rho\pi R^3 V_v^2}{2\lambda} C_p = \frac{\rho\pi 3V_v^2}{2} C_t \quad (\text{II.23})$$

Où C_t est le coefficient de couple. Les coefficients de puissance et de couple sont liés par l'équation :

$$C_p(\lambda) = \lambda \cdot C_t(\lambda) \quad (\text{II.24})$$

L'utilisation du modèle résultant de la théorie de la quantité de mouvement nécessite la connaissance des expressions pour $C_p(\lambda)$ et $C_t(\lambda)$. Ces expressions dépendent principalement de la géométrie caractéristique des lames. Ceux-ci sont adaptés aux caractéristiques particulières du site, la puissance nominale et le type de commande souhaités (tangage ou décrochage) et le fonctionnement (variable ou vitesse fixe) de l'éolienne.

Le calcul de ces courbes ne peut se faire qu'à l'aide d'un logiciel aéroélastique tels que Bladed ou par des mesures expérimentales. A partir de ces courbes, il est intéressant de dériver une expression analytique. Cette tâche est beaucoup plus facile que d'obtenir les courbes elles-mêmes. Sans expression analytique, il sauvegarde des courbes sous forme de tableau un certain nombre de points et calculerait le coefficient correspondant à un λ (angle d'inclinaison) donné au moyen d'une double interpolation. L'expression analytique de $C_p(\lambda)$ ou $C_t(\lambda)$ peut être obtenue, par exemple, par régression polynomiale. Une expression typique qui modélise ces coefficients sera décrite dans la section suivante.

La figure (II.19) montre la courbes $C_p(\lambda)$ et $C_t(\lambda)$ pour un pas de 2.4 MW éolienne que nous avons utilisé dans ce travail. La puissance et le couple de la turbine sont illustrés à la figure (II.19).

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

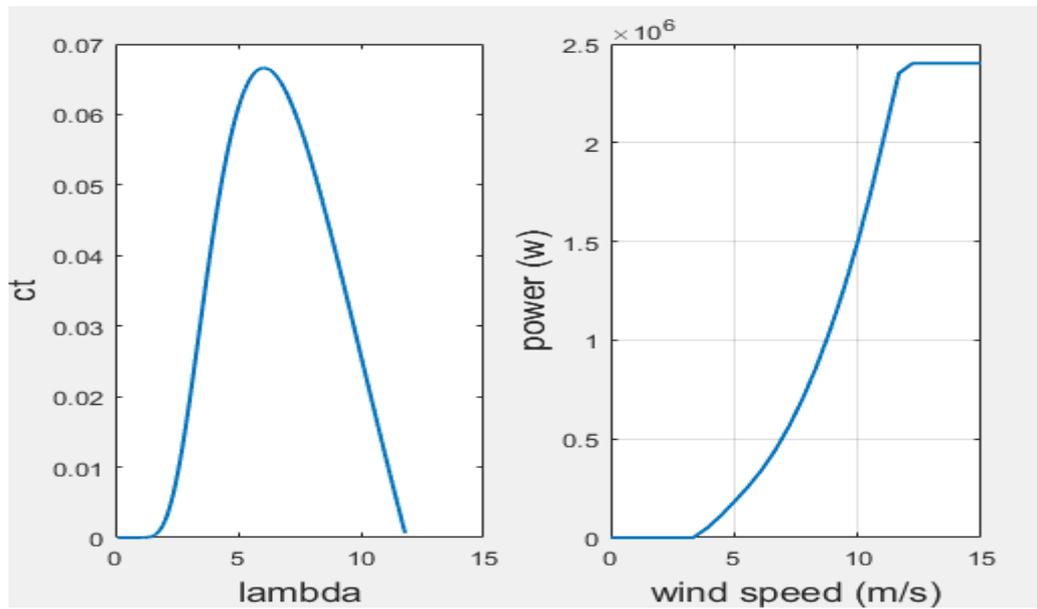


Figure II-19: graphe de la simulation de lambda et le vent

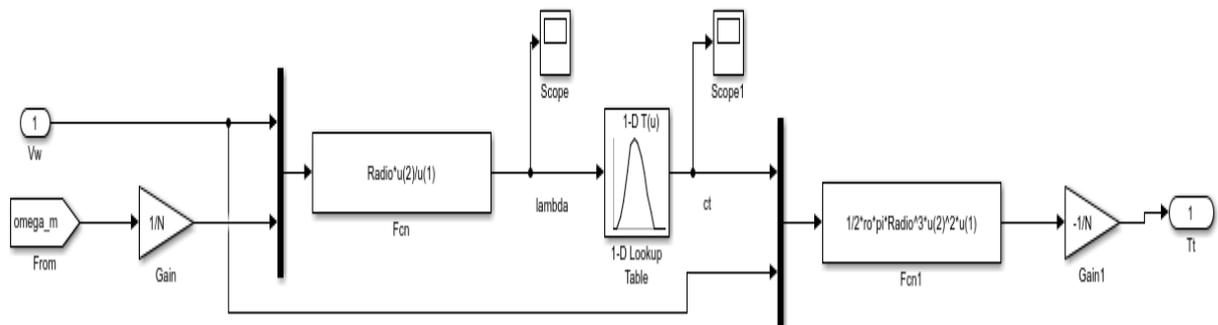


Figure II-20: Schéma block Simulink de la turbine

II.8 Le suivi de point de puissance maximum (MPPT) :

II.8.1 Définition :

Le suivi de point de puissance maximum (MPPT) ou parfois simplement le suivi de point (PPT) est une technique couramment utilisée avec les éoliennes et les systèmes solaires photovoltaïques (PV) pour maximiser l'extraction de puissance dans toutes les conditions.

II.8.2 Description simple concernant le MPPT :

Dans cette région d'opération, l'objectif du contrôle de vitesse est de suivre le chemin d'extraction de puissance maximale. Dans la littérature, une seule méthode est proposée pour réguler l'éolienne à charge suivant la trajectoire d'extraction de puissance maximale.

Un seul type de contrôleurs a été considéré ; c'est le contrôleur de vitesse indirect (ISC) consiste à prendre comme la référence de couple électromagnétique, le couple électromagnétique lié à la courbe de puissance maximale de la figure (I.19) pour chaque valeur de vitesse de rotation de la turbine et en utilisant la nature dynamiquement stable du VSWT (variable speed Wind turbine) autour de cette courbe. Ce contrôleur est appelé contrôleur de vitesse indirect (ISC).

Contrôleur de vitesse indirect On peut facilement montrer que le WT (Wind turbine) est dynamiquement stable autour de n'importe quel point de puissance maximale. Ça signifie que pour toute vitesse de rotation autour d'un point de de variation de puissance maximale, le VSWT revient naturellement à son point de fonctionnement.

Lorsque la turbine fonctionne au point de puissance maximum,

$$\lambda_{opt} = \frac{R\Omega_t}{V_v} \quad C_P = C_{p\max} \quad \text{et} \quad C_t = C_{t\opt}$$

Le couple aérodynamique extrait par la turbine est alors donné par

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{R^2 \Omega_t^2}{\lambda_{opt}^2} \frac{C_{p\max}}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II.25})$$

C'est-à-dire,

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3} C_{p\max} \Omega_t^2 = \lambda_{opt} \Omega_t^2 \quad (\text{II.26})$$

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

Où

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opy}^3 N^3} C_p \max$$

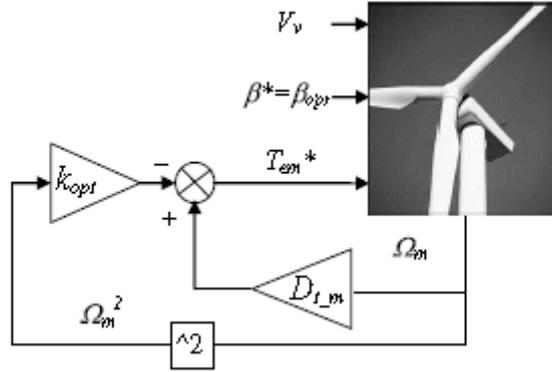


Figure II-21: Contrôle de vitesse indirect.

Il en résulte un couple optimal évoluant selon une fonction quadratique de la vitesse de l'éolienne.

De plus, d'après l'équation de régime permanent,

$$0 = \frac{T_t}{N} - D_t \Omega_t N - K_{tm} (\Omega_{tar} - \Omega_m)$$

(II.26)

$$0 = T_{em} - D_m \Omega_m - K_{tm} (\Omega_m - \Omega_{tar})$$

Où $\Omega_m = N \Omega_t$

$$T_{em} = -\frac{T_t}{N} + (D_t + D_m) \Omega_m \quad (\text{II.27})$$

En remplaçant T_t dans l'équation (II.27) par l'expression (II.26), on a :

$$T_{em} = -K_{opt} \Omega_m^2 + (D_t + D_m) \Omega_m \quad (\text{II.28})$$

Où :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opy}^3 N^3} C_p \max \quad (\text{II.28})$$

Chapitre I : L'état de l'art du système éolien

Cette dernière expression conduit au contrôleur illustré à la figure (II.21). Comme on le voit dans l'équation (II.27), le comportement de la vitesse de rotation. Dépend de la dynamique du couplage mécanique.

Avec la méthode ISC (contrôleur de vitesse indirect), le comportement du couple électromagnétique T_{em} et celui de Ωt est le même, puisque la relation entre Ωt et T_{em} n'a pas de dynamique. Le couple électromagnétique n'est pas utilisé pour augmenter la dynamique Ωt comme il pourrait l'être s'il était la sortie d'un régulateur. Ainsi, le principal inconvénient de l'ISC (contrôleur de vitesse indirect) est que la dynamique de couplage mécanique n'est pas annulée, conduisant à une réponse douce fixe du système.

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

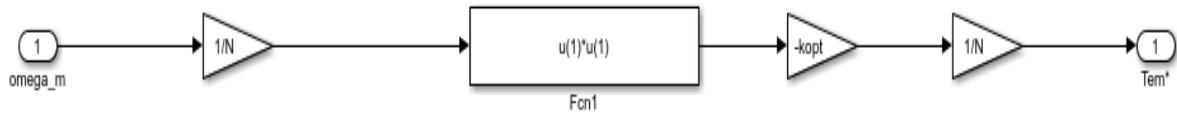


Figure II-22: Schéma bloc Simulink de M 1

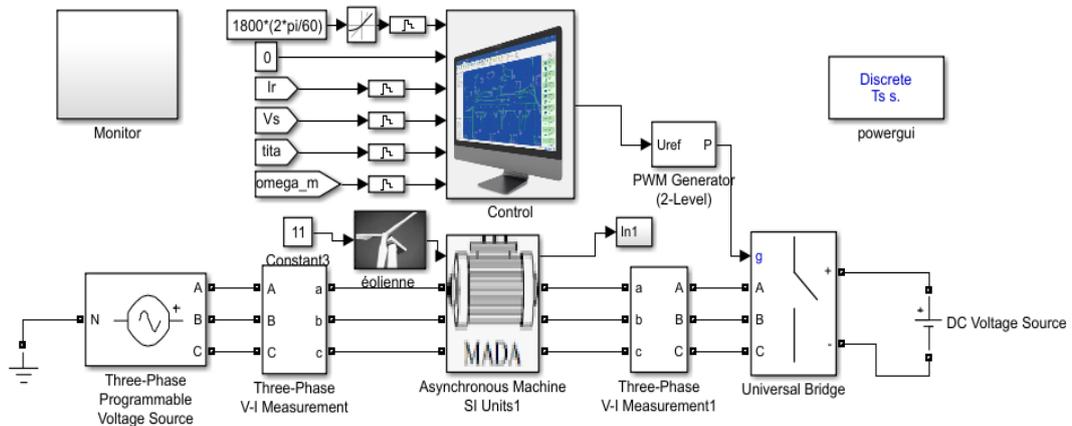


Figure II-23: Schéma block du système développé sur MATLAB Simulink.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une étude générale de la machine asynchrone à double alimentation. Comme il a été montré, la MADA présente les avantages de la machine asynchrone à cage usuelle (robustesse, moins chère....). Elle présente aussi, l'avantage de travailler dans des gammes de variation de vitesse importantes.

La souplesse de cette machine la rend de plus en plus capable de remplacer d'autres machines, particulièrement lorsqu'elle fonctionne en mode générateur. En effet, la présence des convertisseurs bidirectionnels au niveau du rotor la rend capable d'échanger les

Chapitre II : Modélisation et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

puissances actives et réactives avec le réseau. Le contrôle de l'échange des puissances est devenu, donc, un aspect important qui caractérise la MADA., nous avons également présenté la commande vectorielle que nous allons utiliser pour l'intégration d'une turbine éolienne dans un réseau électrique, nous avons ainsi donné un aperçu sur les différentes techniques existantes, qui permettent une commande adéquate de la puissance active et réactive de la MADA et pour cela on a utilisé la commande vectorielle pour permettre de découpler le modèle de la MADA afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau.

Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux variations des paramètres de la machine. Le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle indirect.

Où on va visualiser les différents résultats dans le 3ème chapitre avec une simulation de notre modèle à l'aide du logiciel Matlab Simulink.

Chapitre III : Résultats de la simulation

III.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous présentons dans un premier temps le choix des différents paramètres du système éolien basé sur une MADA (parties puissance et commande) .et analysons les résultats obtenus par simulation pour deux points de fonctionnement en mode hypo ou hypersynchrone. Et pour plusieurs scénarios possibles que nous avons choisies tel que le système sans turbine basé sur la MADA (sans et avec redressement et en régime permanent), avec turbine (à vitesse du vent fixe), enfin nous allons montrer les différents résultats de la commande que nous avons élaborée avec Matlab Simulink.

III.2 Choix des paramètres du système éolien

III.2.1 Partie « puissance »

Les différents paramètres électriques et mécaniques du système éolien étudié sont rassemblés dans le Tableau III.1.

Tableau III.1: Paramètres mécaniques et électriques du système éolien étudié.

Système	Paramètres
Turbine	Nombre de pales : 3 $R = 42\text{m}$, $J_t = 1,4 \cdot 10^6 \text{kg.m}^2$ $v_n = 11 \text{ m/s}$, $N_m = 1500\text{tr/min}$
MADA	$U_r = U_s = 690 \text{ V}$ $P_n = 2.4\text{MW}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $p = 2$, $N_r/N_s \approx 1$ $R_s = 4\Omega$, $R_r = 4,88 \Omega$ $L_{si} = 0.08e-3 \text{ H}$, $L_m = 2.5e-3 \text{ H}$ $J_m = 114 \text{ kg.m}^2$
Réseau électrique	$U = 690 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$

III.2.2 Partie "commande"

Les paramètres des différentes commandes du système éolien sont consignés dans le Tableau III.2.

Tableau III.2: Paramètres de commande du système éolien étudié

Commande	Paramètres
Contrôle MPPT	$\lambda_{opt} = 7,2$ $C_{pmax} = 0,44$

III.3 Simulation et interprétation des résultats :

III.3.1 simulation du système sans turbine :

Pour comprendre le fonctionnement du système, et pour optimiser son fonctionnement, nous allons commencer par déconnecter la turbine et la remplacer par une source de couple continu. Ceci afin de vérifier le dimensionnement de la machine et la justesse de la commande.

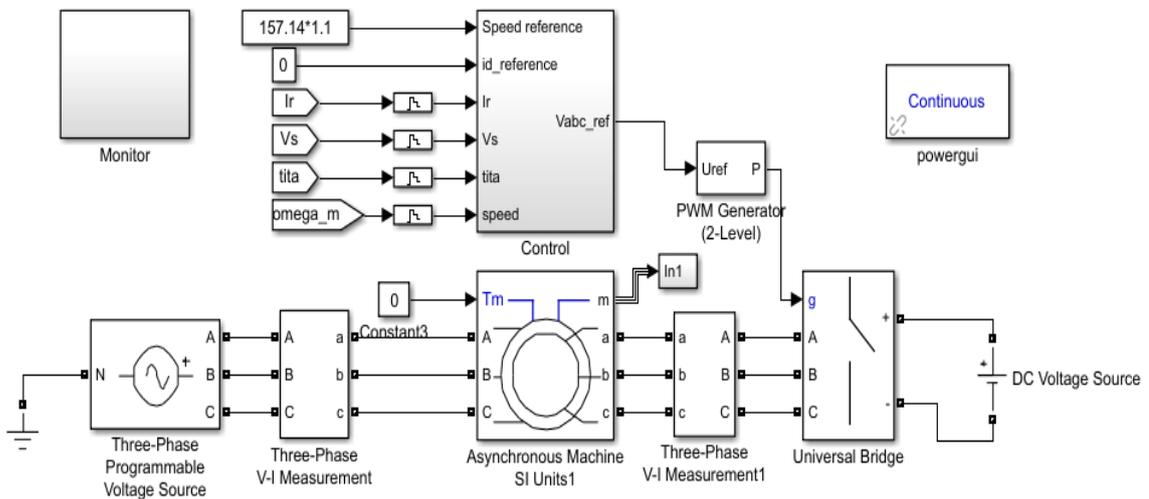


Figure III.1: Schéma block du système développé sur MATLAB Simulink SANS turbine pour une charge = 0

Chapitre III : Résultats de la simulation

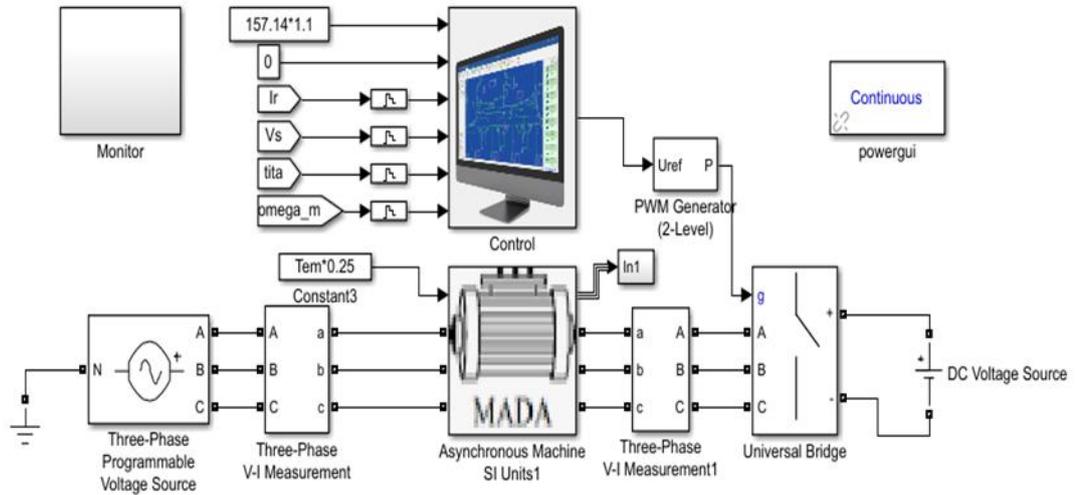


Figure III.2: Schéma block du système développé sur MATLAB Simulink SANS turbine pour une charge constante à 25%

➤ Les résultats :

Les Résultats de simulation de la MADA à vide et en charge pour une durée de 5 s :

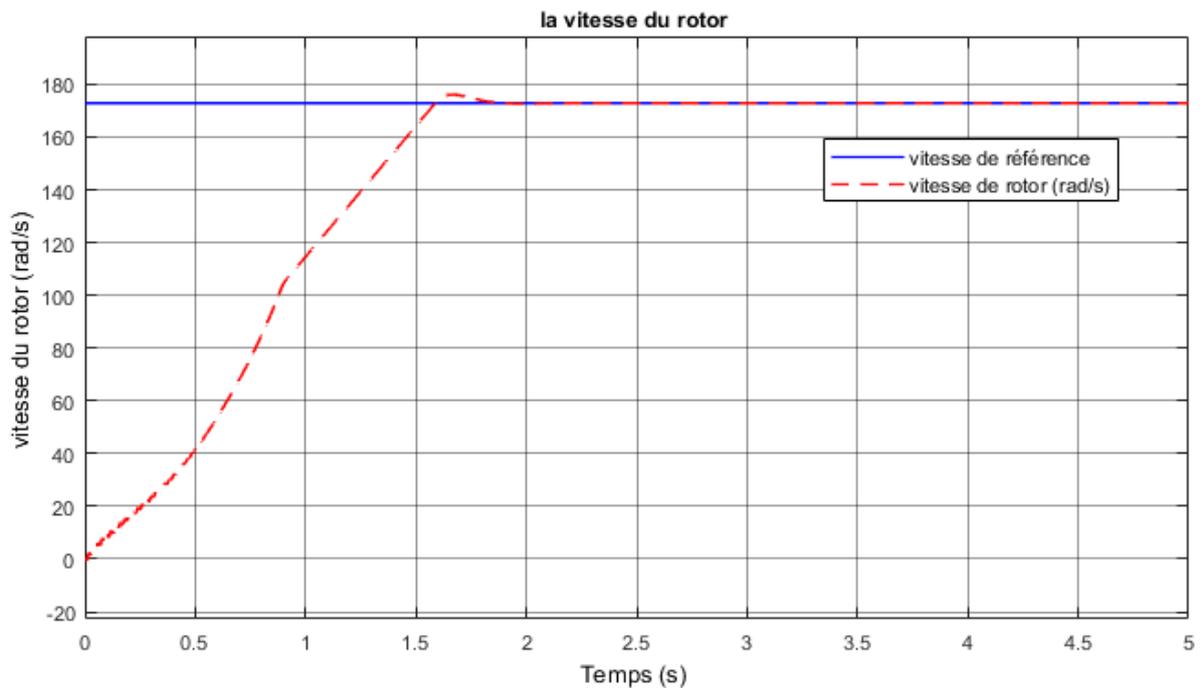


Figure III.3: la vitesse du rotor en (rad/s)

Chapitre III : Résultats de la simulation

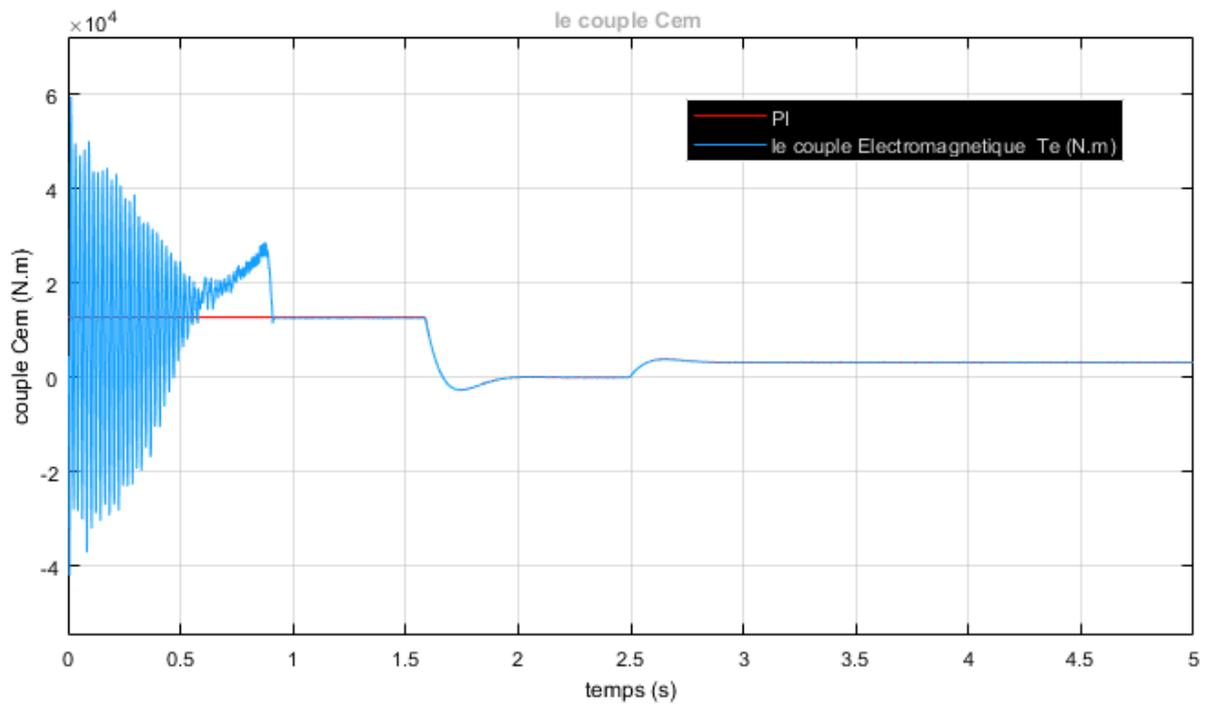


Figure III.4: le couple C_{em} (N.m)

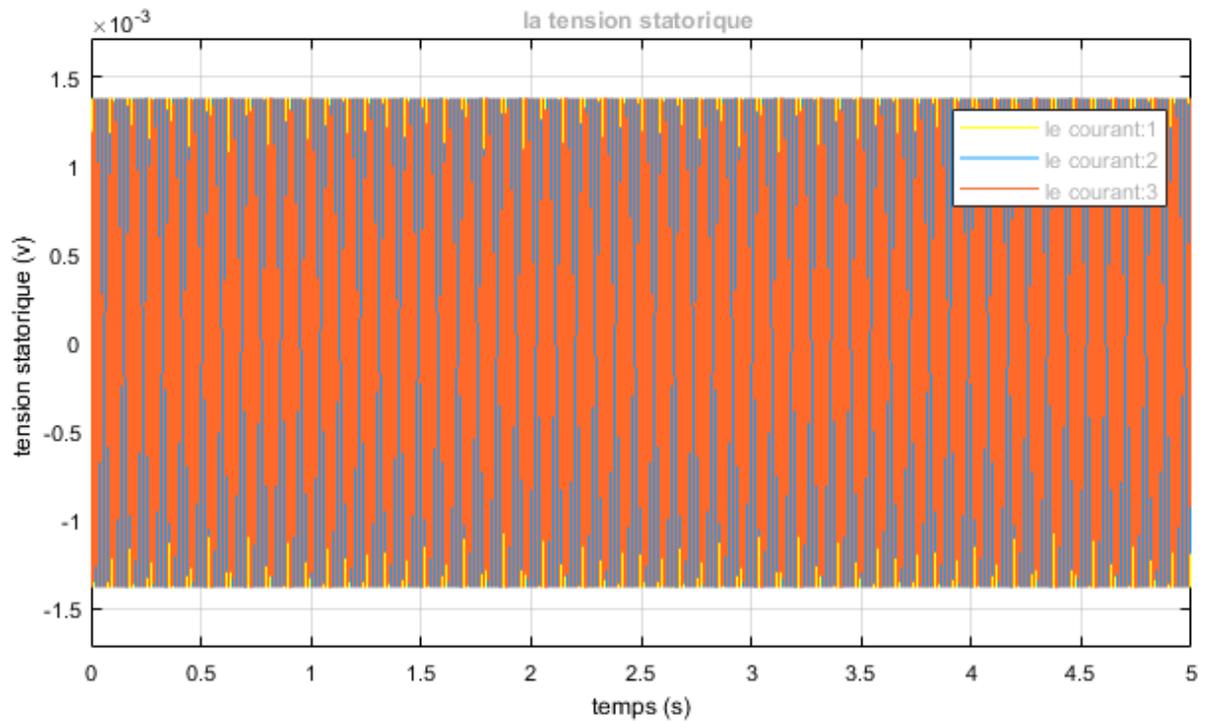


Figure III.5: tension statorique en (v)

Chapitre III : Résultats de la simulation

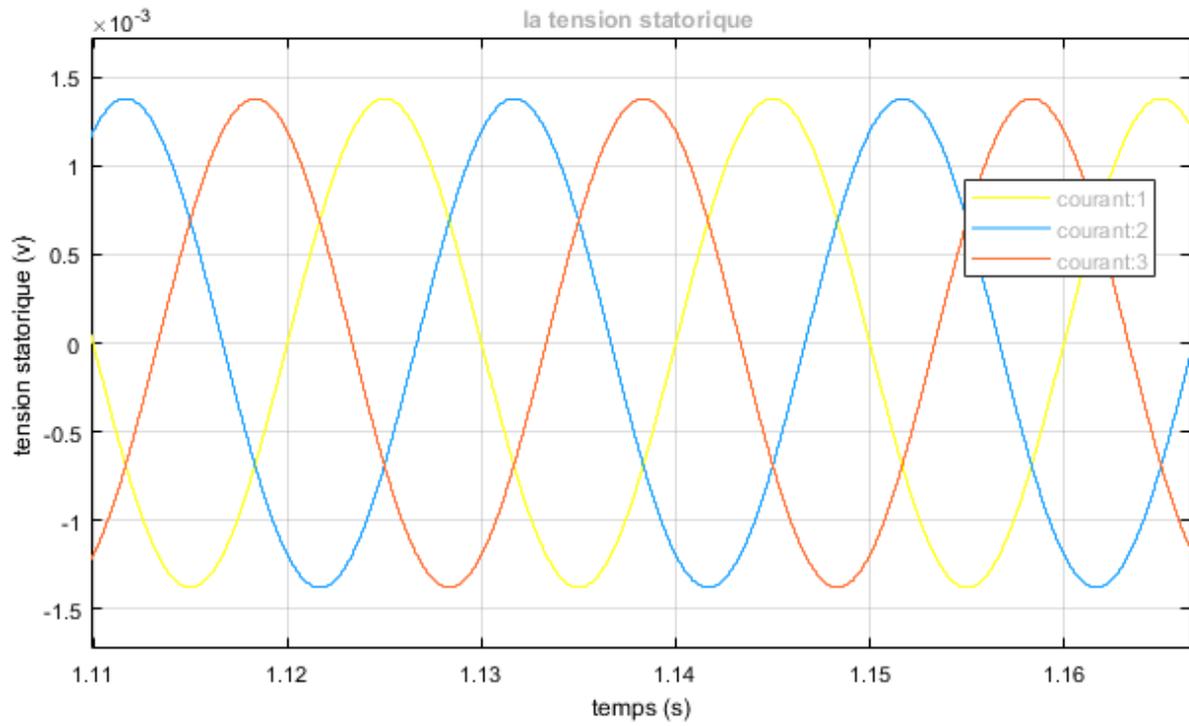


Figure III.6: zoom de la tension stator

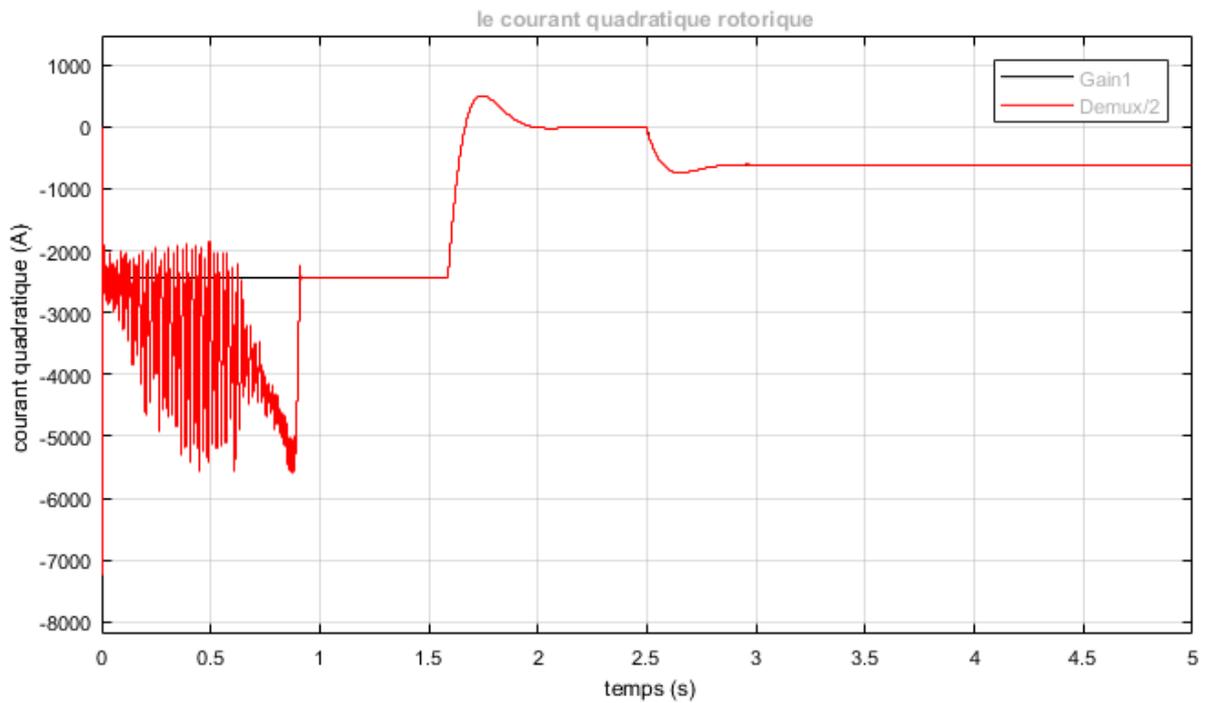


Figure III.7: courant de quadratique rotorique

O

Chapitre III : Résultats de la simulation

n remarque que le courant quadratique est négative ce qui signifie que notre MADA travaille en mode moteur.

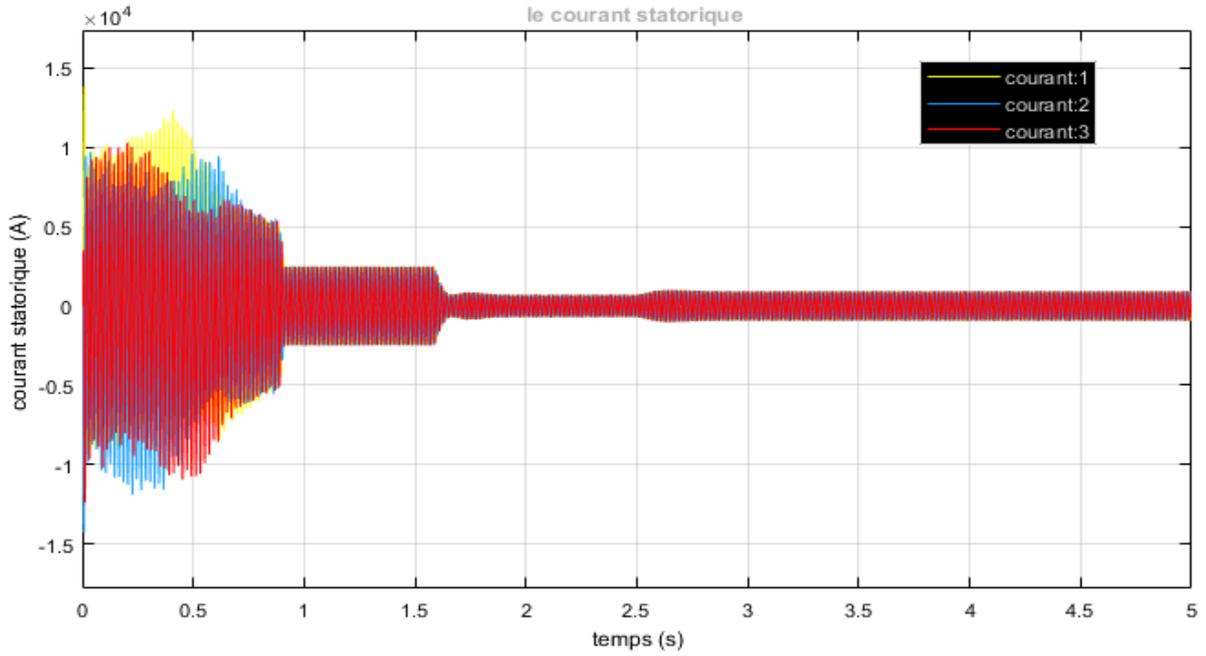


Figure III.8:le courant statorique (A)

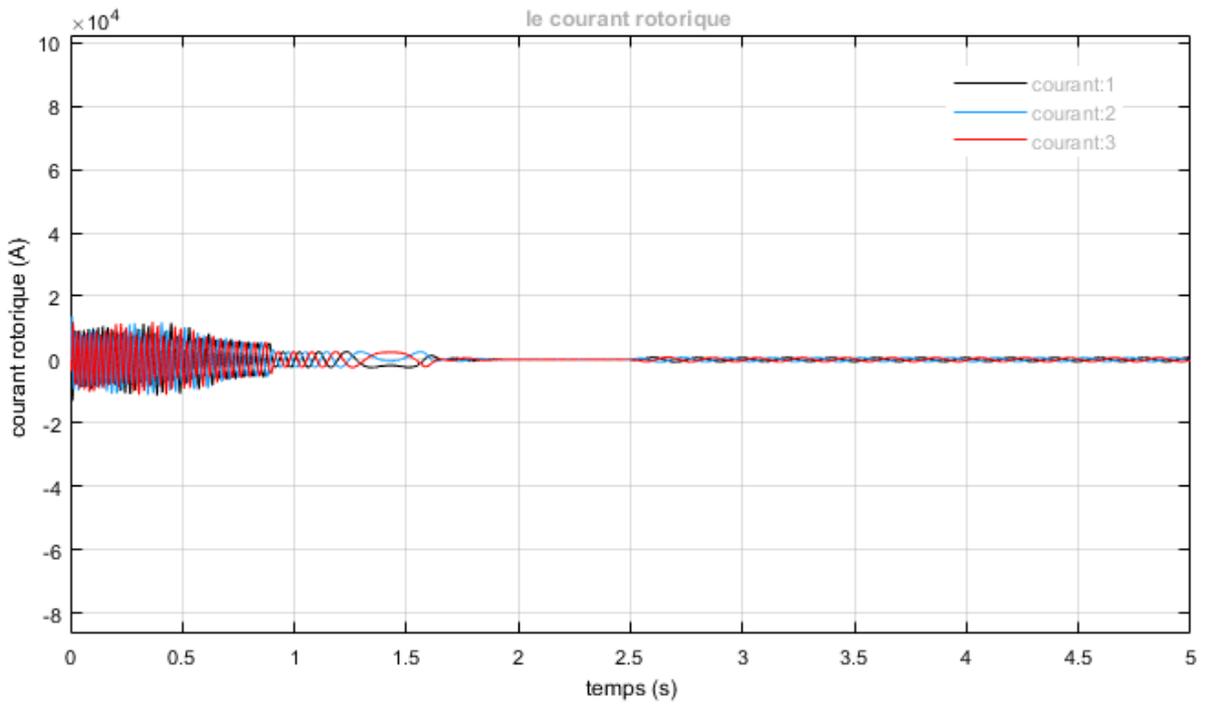


Figure III. 9:le courant rotorique (A)

➤ **Interprétation des résultats :**

Pour le bon fonctionnement de la MADA, on suit la procédure suivante :

Pour le premier fonctionnement, on a simulé le comportement dynamique de la MADA sans alimentation rotorique (rotor en court-circuit), le stator étant alimenté par un réseau triphasé équilibré, qui signifie que la MADA fonctionne comme une machine asynchrone à rotor bobiné en court-circuit.

Les figures III.1 à III.7 représentent le fonctionnement de la MADA sans charge après un démarrage à vide et sans alimentation rotorique (fonctionnant comme machine asynchrone classique « moteur »), on remarque que la machine fait appel un fort courant lors du démarrage « courant de démarrage » et que la vitesse augmente proportionnellement avec la diminution du couple C_{em} et atteint sa valeur finale qui vaut 179 rad/s, qui est expliqué par le fait que lors du démarrage, la machine a besoin d'une certaine puissance mécanique pour fonctionner « faire tourner le rotor » avant de se stabiliser à ses valeurs de références, Après la diminution du glissement et des forces mécaniques par la suite.

Après l'introduction d'une charge constante $T_{em} * 0.25$ qui représente 25% de la charge a l'instant $t = 2.5$ s, la caractéristique de la vitesse présente une légère diminution de 179 à 172.9 rad/s environ puis remonte à 179rad/s rapidement, cela est traduit par une augmentation du glissement de la machine après intégration de la charge , par conséquent les courants statoriques et rotoriques augmentent dû à l'appel d'un courant plus fort pour compenser la charge supplémentaire et pour stabiliser la vitesse de notre machine a son fonctionnement nominal « mode moteur ».

III.3.2 Simulation du système avec turbine :

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de simulation du modèle de la machine asynchrone à double alimentation intégrée dans un système éolien. Nous avons choisi un profil du vent pour une période de 0 et 5 secondes pour deux vitesses de vent (8m/s et 11m/s), afin d'avoir une puissance active de référence, La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire côté stator. Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives statorique appliquée à la MADA intégrée dans un système éolien suivant :

Chapitre III : Résultats de la simulation

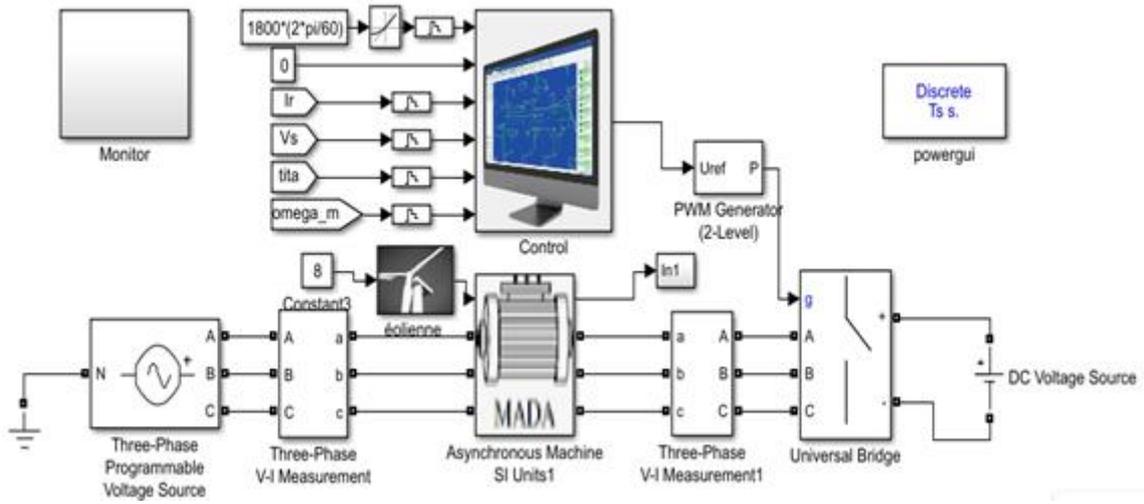


Figure III. 10: Schéma block du système développé sur MATLAB Simulink avec turbine

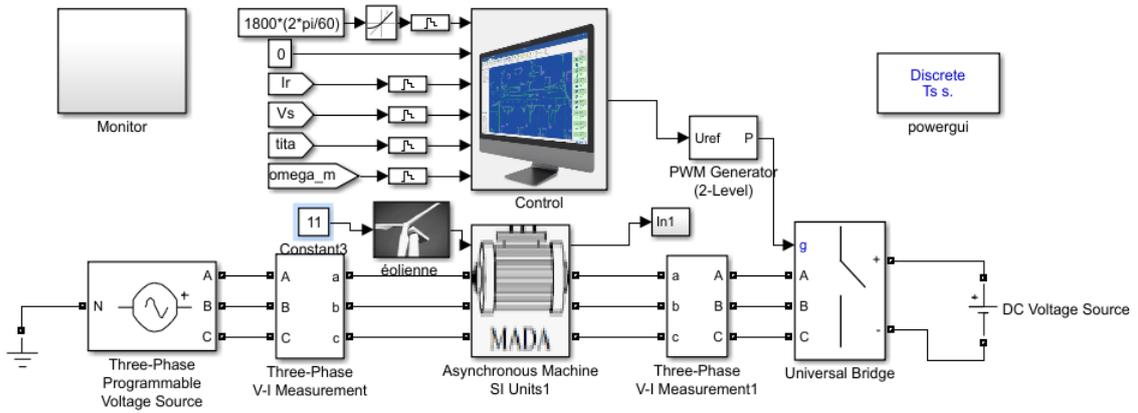


Figure III. 11: Schéma block du système développé sur MATLAB Simulink avec turbine

Chapitre III : Résultats de la simulation

➤ Les résultats :

Les Résultats de simulation de système avec la turbine pour une intervalle de temps $t = 5s$ pour deux vitesses $V_v = 8 \text{ m/s}$, $V_v = 11 \text{ m/s}$ seront présentés ci-dessous :

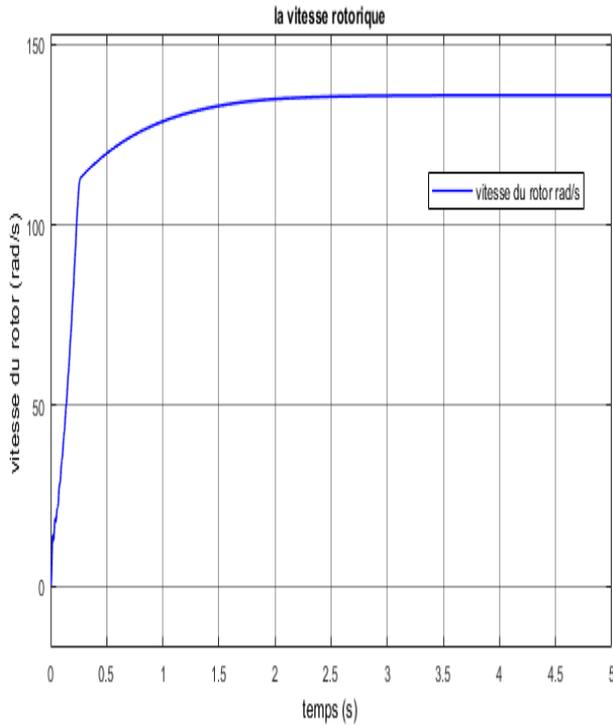


Figure III. 13: la vitesse du rotor à $V_v = 8 \text{ m/s}$

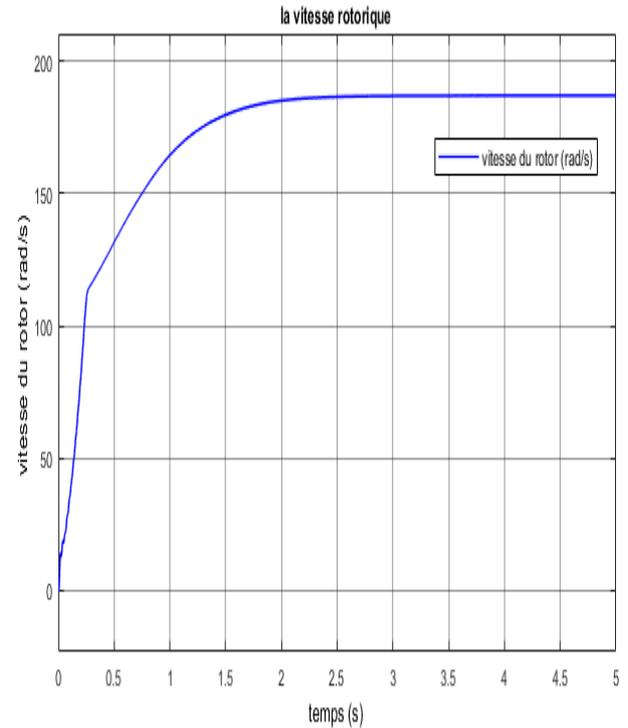


Figure III. 14: la vitesse du rotor à $V_v = 11 \text{ m/s}$

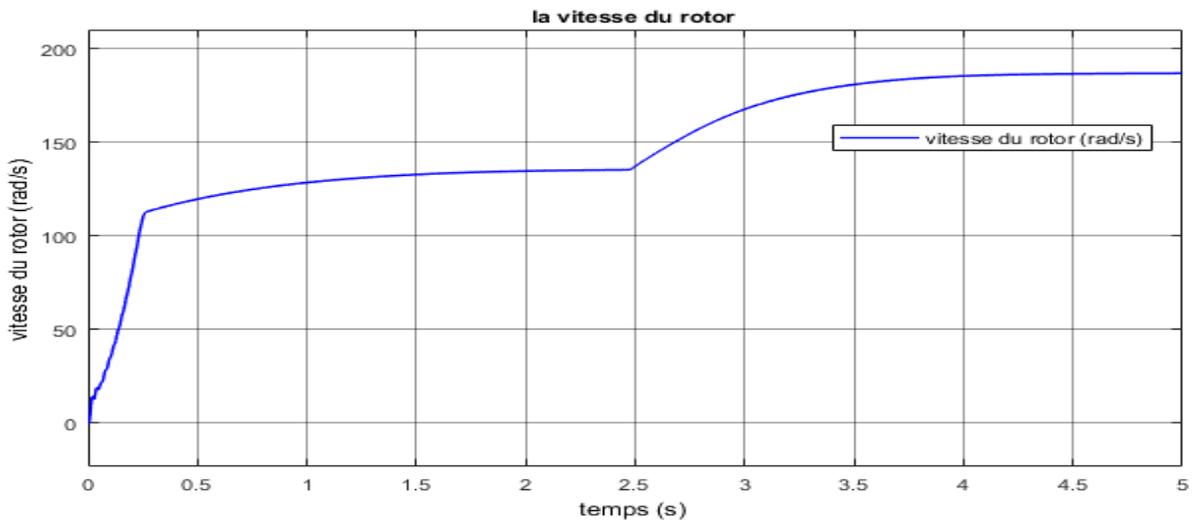


Figure III. 12: la vitesse du rotor de $V_v = 8 \text{ m/s}$ à $V_v = 11 \text{ m/s}$

Chapitre III : Résultats de la simulation

Dans les figures III.13 et III.14 On prend pour titre d'exemple deux points de fonctionnement 8m/s et 11m/s séparément pour tester nos paramètres. On remarque en premier temps sur la figure III.13 la variation de la vitesse du rotor a 8m/s qui augmente jusqu'à une valeur maximal d'environ 130 rad/s à partir de temps 2sec. En deuxième temps on remarque sur la figure III.14 la variation de la vitesse du rotor a 11m/s qui augmente jusqu'à atteindre la valeur de référence a une valeur maximal d'environ 179rad/s à partir de 2sec. qui est expliqué par le fait que la vitesse du vent optimale pour le bon fonctionnement de notre MADA est de 11m/s pour produire une puissance maximum de 2.4Mw. Dans la figure III.12 qui illustre la variation brusque de la vitesse du vent de 8m/s a 11m/s, ou on constate que la vitesse du rotor augmente et se stabilise toujours dans un régime permanent malgré les variations du vent et cela et du a notre commande MPPT qui suis le point maximum de contrôle pour récupérer le maximum de puissance pour différentes vitesses du vent.

Chapitre III : Résultats de la simulation

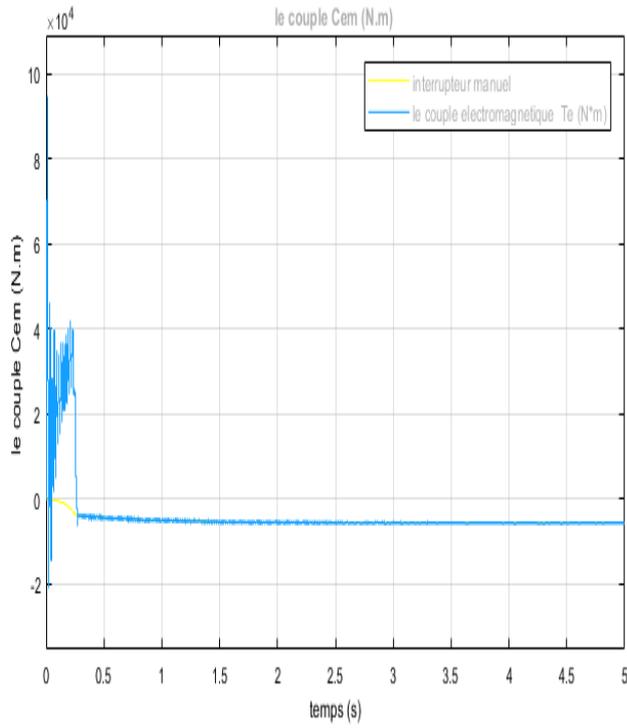


Figure III. 15:le couple Cem à 8 m/s

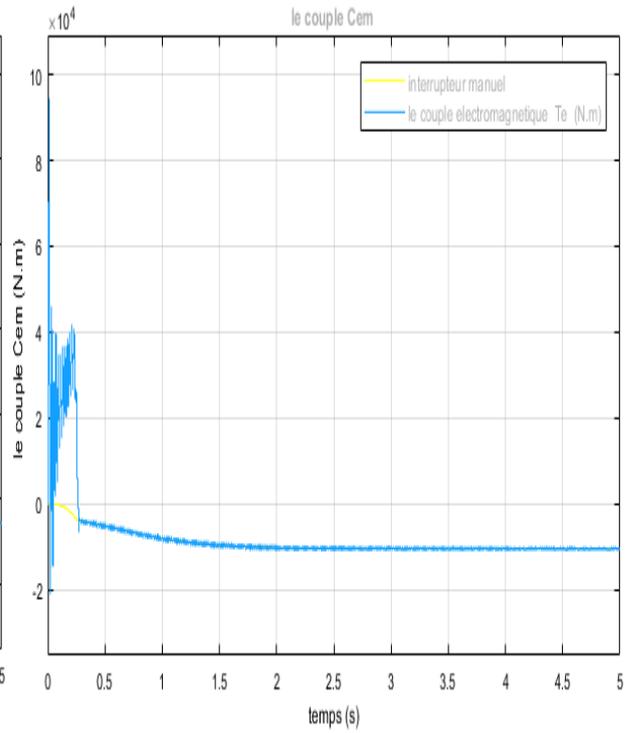


Figure III.1 16:le couple Cem à 11 m/s

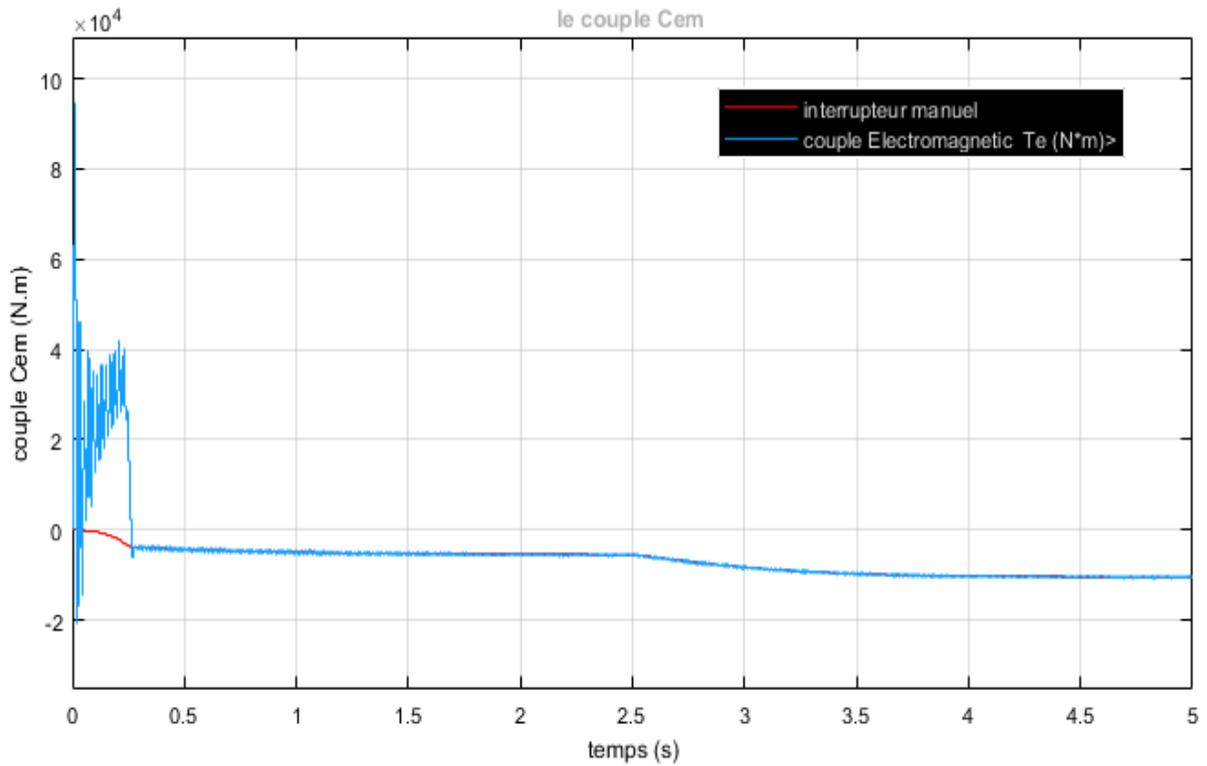


Figure III. 17:le couple Cem du $V_v = 8$ m/s à 11 m/s

Chapitre III : Résultats de la simulation

on remarque dans les figures III.15 et III.16 la variation du couple C_{em} par rapport au temps selon deux point de fonctionnement .ou on constate une variation elever a des valeurs positives allant de 0Nm jusqu'à 4Nm entre un intervalle de temps de 0 a 0,4 environs,du au forces mecaniques et synetiques appliqué sur l'arbre du rotor .jusqu'a se qu'ils diminuent en desous de 0Nm suivant la valeur de reference et se stabilise a partire de 1 s environs en desous de 0Nm du a la dimunition des forces mecaniques et synetiques .neomoins on note qu'il ya une difference entre les deux points de fonctionnement dans la figure III.17,en effect on constate que le couple diminue d'avantage pour les vitesses de rotations plus elever qui sont - 0,5Nm pour une vitesse de vent 8m/s et -1Nm pour une vitesse de vent de 11m/s sela est expliqué par le fait que les forces mécaniques et synétiques (forces d'inertie) diminuent avec l'augmentation de la vitesse de rotation de l'arbre.

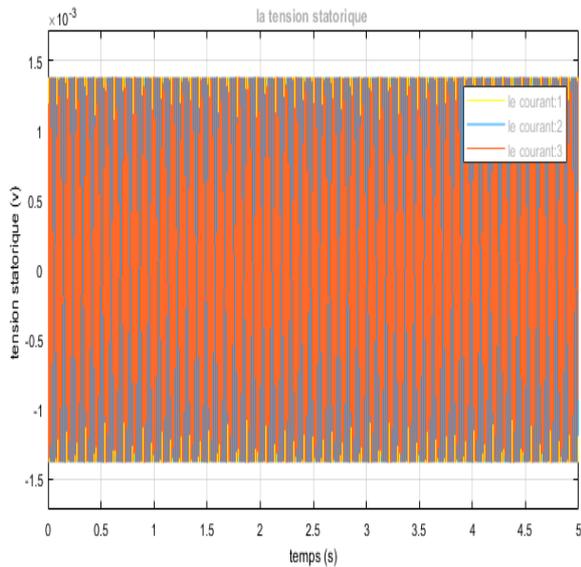


Figure III.18:La tension du stator pour

$V_v = 8 \text{ m/s}$

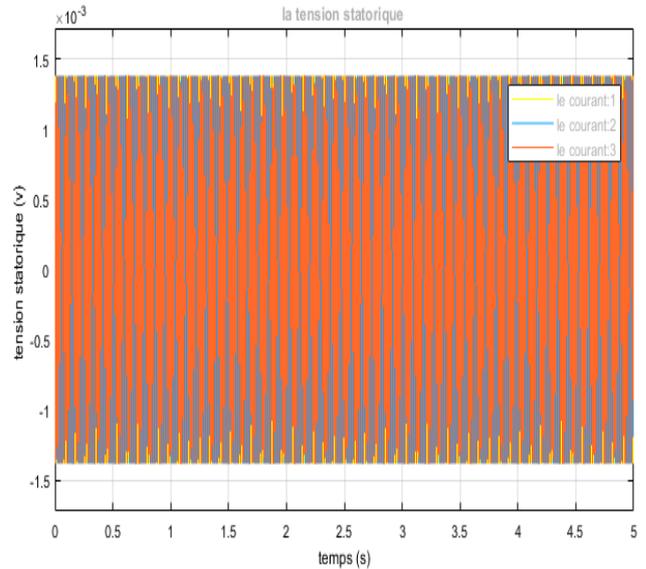


Figure III.19:La tension du stator pour

$V_v = 11 \text{ m/s}$

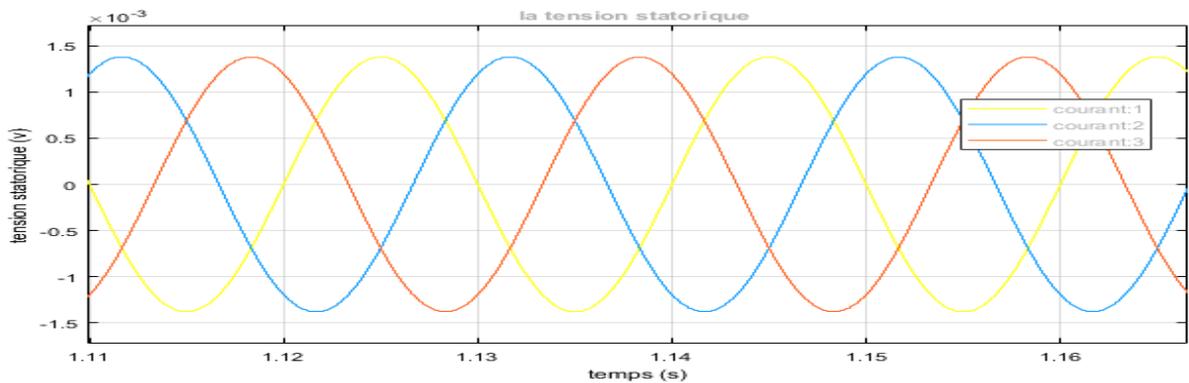


Figure III.20 ::zoom de la tension du stator pour $V_v = 8 \text{ m/s}$ et $V_v = 11 \text{ m/s}$

Chapitre III : Résultats de la simulation

On remarque dans les figures III.18 et III.19 la variation de la tension statorique reste fixe pour différentes vitesses appliqué.

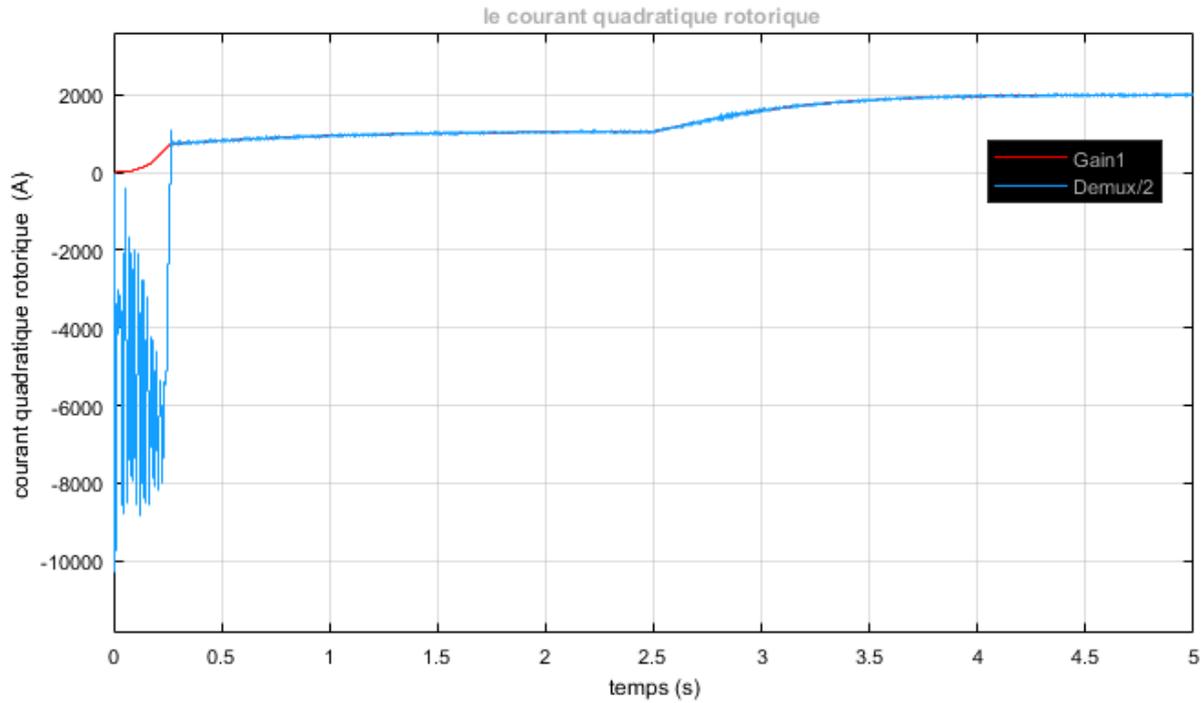


Figure III.22 :le courant quadratique

On remarque que le courant quadratique est positive ce qui montre que notre MADA fonctionne en mode génératrice, ou on constate une augmentation du courant à l'instant 2.5 s après l'augmentation de la vitesse du vent de 8m/s à 11m/s qui est expliqué par le fait que notre système produit plus de puissance avec l'augmentation de la vitesse du vent capté .

Chapitre III : Résultats de la simulation

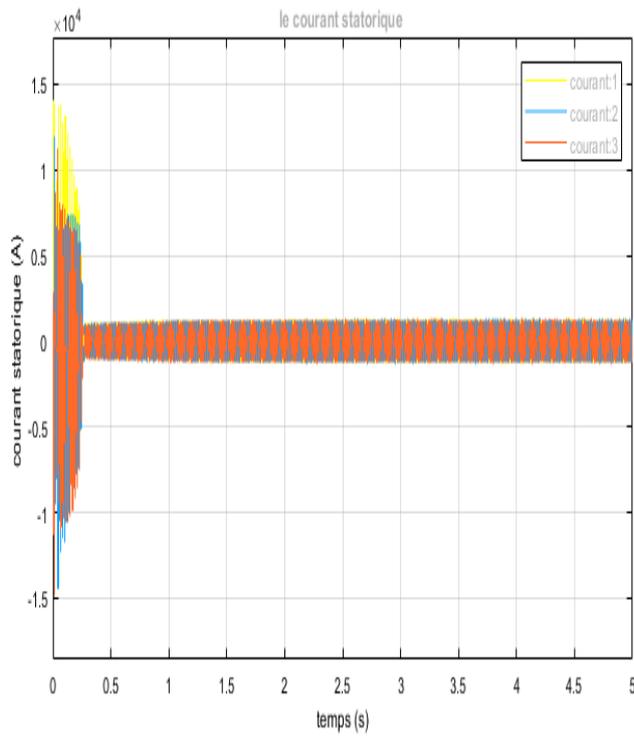


Figure III.22 : le courant statorique à $V_v=8$ m/s

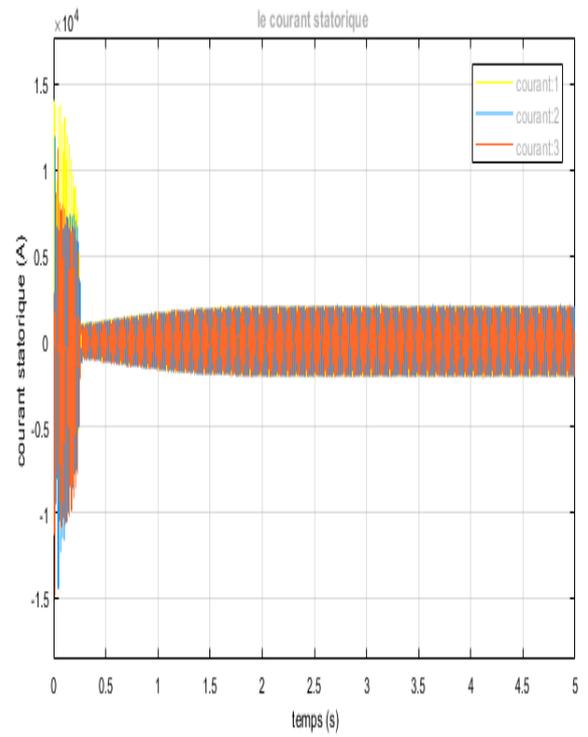


Figure III.23 : le courant statorique à $V_v=11$ m/s

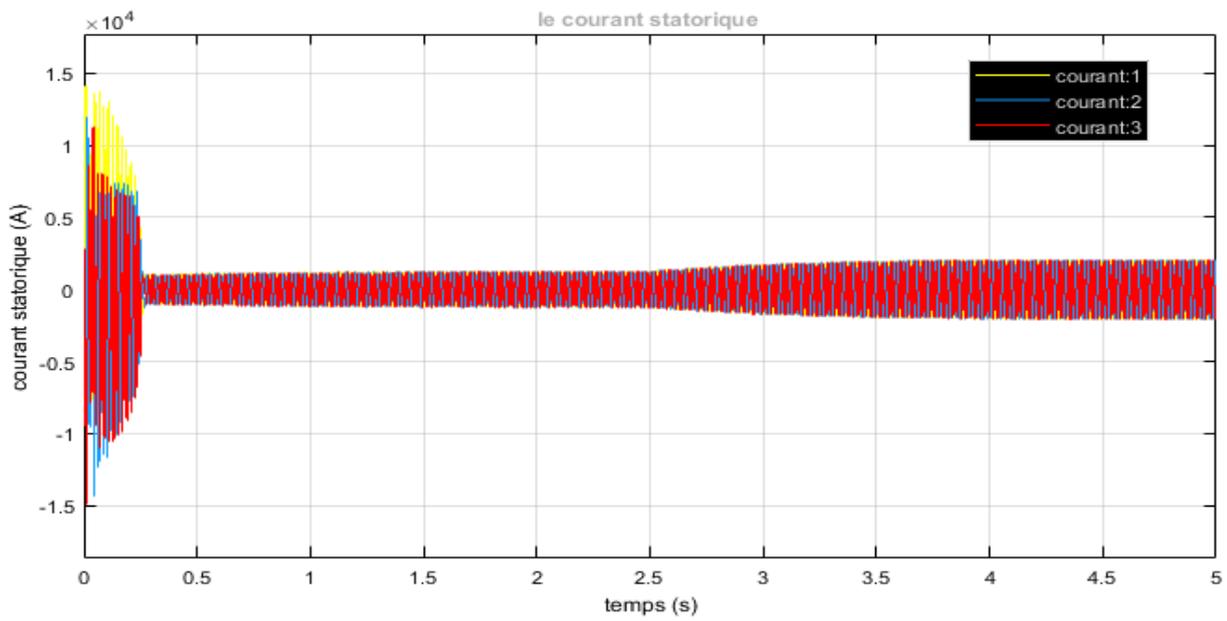


Figure III.24 : le courant statorique du $V_v=8$ m/s à 11 m/s

Chapitre III : Résultats de la simulation

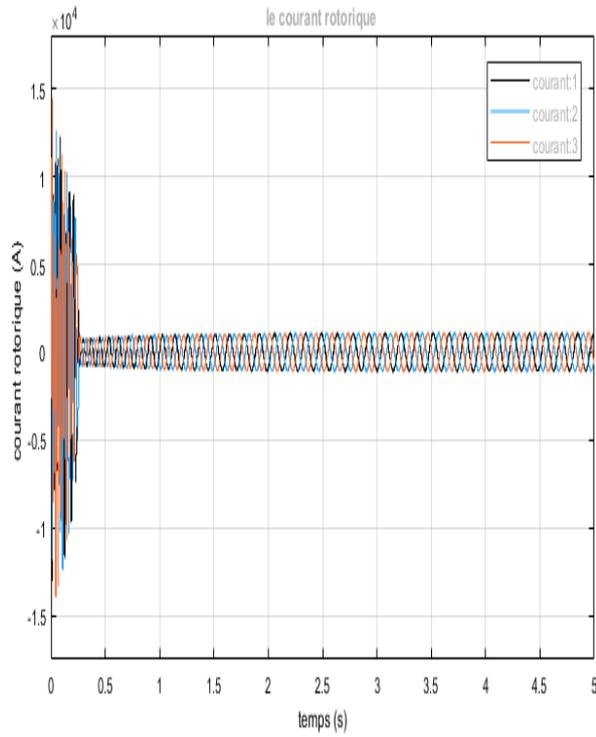


Figure III.25:le courant rotorique à $V_v= 8 \text{ m/s}$

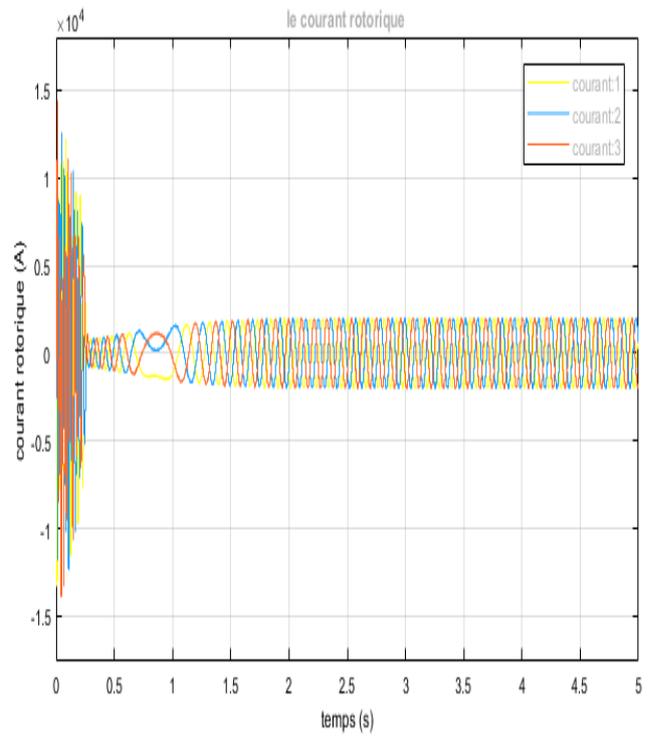


Figure III.26 :le courant statorique à $V_v= 11 \text{ m/s}$

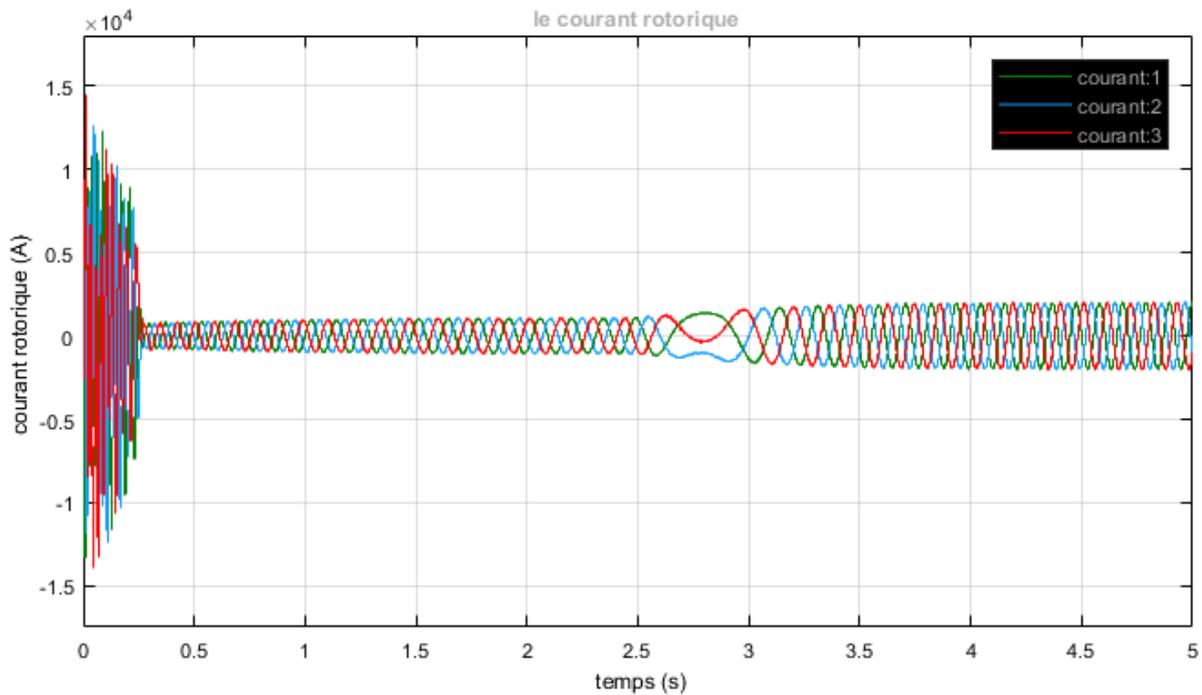


Figure III.27:le courant rotorique du $V_v=8 \text{ m/s}$ à 11 m/s

On remarque sur les figures III.24, III.27 la variation des courants rotoriques et statoriques par rapport au temps. Où on note que le courant statorique est plus élevé que le courant rotorique et cela est j

Chapitre III : Résultats de la simulation

ustifier par le fait qu'on magnétise la partie rotoriques avec la partie statorique ainsi le courant rotorique suit le courant statorique ,on note également que le system fais appel à plus de courant lors du démarrage avec des perturbations dans la phase transitoire a l'instant 0 a 0,4 environs jusqu'il diminue et se stabilise au régime permanent a partie de 1,5sec environs .on constate néanmoins une différence entre les 2 point de fonctionnement de 8m/s a 11m/s .ou la consommation du courant augmente avec l'augmentation de vitesse avec une perturbation entre l'intervalle 2.3 s et 3 s du a la variation soudaine de la vitesse de 8m/s a 11m/s qui finit par se stabilisé après 3 s après une augmentations .

Résultats et discussion

Dans les sections précédentes, le convertisseur côté charge et le convertisseur côté rotor sont déjà discutés. Le modèle de simulation du système de production d'énergie éolienne autonome à vitesse variable utilisant une machine à induction à double alimentation est conçu dans MATLAB/Simulink. La discussion des résultats, enregistrés dans différentes conditions, est présentée dans cette section. Pour simplifier la connexion du rotor de la MADA au réseau électrique, nous avons modélisé le réseau comme une source alternative. Dans le cas du stator il est connecté au convertisseur AC/DC pour cela nous avons connecté le stator avec un générateur de courant continue. Les paramètres requis pour la simulation et le calibre des convertisseurs d'électronique de puissance sont répertoriés dans le tableau III.1. La vitesse du vent est réglée pour produire la puissance requise pour différentes conditions de charge (à 8m/s et 11m/s). Pour fournir la magnétisation initiale du système, une source de batterie à courant continu est nécessaire La tension statorique de référence requise pour la simulation est de 690 V .Après simulation, divers résultats sont obtenus qui montrent que la tension statorique générée suit la valeur de référence et reste à la valeur spécifiée et la fréquence est égale à 50 Hz dans les deux cas.

Dans les différentes conditions de fonctionnement à vitesse de vent fixé à 8m/s puis a 11m/s, la vitesse du générateur est également fixe, mais en cas de variation de la condition de charge, la valeur du couple varie . Lorsque la machine fonctionne en mode générateur et répond en fonction du couple fourni par l'éolienne, le couple générateur est représenté par un signe négatif.

La tension de charge reste constante et le courant variable, la variation de la puissance active ainsi que la variation du couple et de la vitesse du générateur dépendent de la condition de charge de fonctionnement indiquée par simulation. En effet on constate que pour des vitesses

Chapitre III : Résultats de la simulation

de vent inférieurs à la vitesse 11m/s notre système ne fonctionne pas d'une façon optimale et la MADA ne produit pas une puissance d'une façon optimale (2.4MW) néanmoins grâce à la MPPT qui assure l'optimisation notre système on arrive à produire le maximum de puissance même à partir des vitesses les plus faibles.

III.4 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, Différents cas possibles ont été analysés pour voir la performance de notre système. Différents résultats des performances de notre système et de sa commande ont été enregistrés pour différentes zones de fonctionnement, pour montrer l'efficacité du système présenté en termes de puissance active, courants et tensions, couple et vitesse du générateur...Ext. à vide et sous charge pour le fonctionnement en mode moteur, et à deux vitesses fixes (8m/s et 11m/s) pour le fonctionnement en mode génératrice. À l'aide d'études de simulation via MATLAB/SIMULINK.

Le résultat est logique pour le fonctionnement en mode moteur est satisfaisant pour le mode de fonctionnement en génératrice d'après les caractéristiques de notre MADA.

Conclusion Générale

Dans cette thèse, une étude complète du système de production d'énergie éolienne a été présentée ou nous nous sommes intéressées aux éoliennes à vitesse variable basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme l'ont montré les précédents chapitres. Dans un premier temps, nous avons expliqué pourquoi ce système éolienne est le plus utilisé actuellement, notamment en raison des économies réalisées grâce au faible dimensionnement des convertisseurs statiques triphasés mis en œuvre.

Ensuite, nous avons étudié la modélisation des différents constituants du système éolien. En effet, les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés. Puis, dans le but d'établir les différentes commandes des deux convertisseurs, nous avons développés les modèles de la MADA.

Dans la suite de ce mémoire, nous avons analysés grandeurs électriques sur de courts intervalles de temps, donc nous avons considéré que l'éolienne se situait dans sa zone de fonctionnement optimale et qu'elle fonctionnait en régime permanent quelle que soit la vitesse du vent appliquée sur les pales. Nous avons donc centré notre étude sur la commande dans cette zone de fonctionnement permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent avec la méthode de contrôle MPPT.

Enfin, afin de valider la modélisation et la commande globale du système éolien, nous avons effectué des simulations pour deux points de fonctionnements : l'un en mode hyposynchrone et l'autre en mode hypersynchrone. Les résultats obtenus ont montré que les puissances actives du système éolien pouvaient être contrôlées de façon indépendante tout en garantissant une puissance active optimale fournie au réseau électrique quel que soit le mode de fonctionnement.

Comme perspectives et potentiel améliorations de ce travail en future, on propose :

- La modélisation complet du convertisseur et le réseau électrique puisqu'ils sont considérés comme des générations DC et AC, respectivement.
- la durée de simulation peut être étalée pour analyser le fonctionnement de systèmes avec des données réelles (profil de vitesse de vente plus longue).
- D'autres méthodes de contrôle peuvent être programmé et comparé avec la commande vectorielle telle que le contrôle flou.
- Développement de la commande de la puissance réactive.

ANNEXES

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau III.3

Paramètre DFIG	Valeur
Puissance nominale	2.4 MW
Tension nominale du stator ligne à ligne (Vrms)	690 V
Tension nominale du rotor ligne à ligne (Vrms)	2070 V
Connexion stator et rotor	Étoile et étoile
Fréquence nominale	50 Hz
Résistance statorique et inductance de fuite	2.6e-3 Ω
Résistance du rotor et inductance de fuite	2.9e-3 Ω
Inductance de magnétisation	2,5 mH
Nombre de paires de pôles	2
Puissance nominale du transformateur correspondant	1 MW, 690/2070 V efficace
Temps d'échantillonnage	5 sec

Programme de simulation

```
1 - close all
2 - clear all
3 - clc
4
5 - %% DFIG parameters -> Rotor parameters referred to the stator side
6
7 - f = 50; % stator frequency (Hz)
8 - Ps = 2e6; % Rated stator power (W)
9 - n = 1500; % rated rotational speed (rev/min)
10 - Vs = 690; % rated stator voltage (v)
11 - Is = 1760; % rated current (A)
12 - Tem = 12732; % rated torque (N.m)
13
14 - p=2; % Pole pair
15 - u= 1/3; % stator/ rotor turn ratio
16 - Vr= 2070; % rated rotor voltage (non reached ) (v)
17 - smax = 1/3; % max slip
18 - Vr_stator = ( Vr*smax)*u; % rated rotor voltage referred to stator (V)
19 - Rs = 2.6e-3; %stator resistance (ohm)
20 - Lsi = 0.08e-3; % leakage inductance ( stator & rotor ) (H)
21 - Lm = 2.5e-3 ; % magnetizing inductance (H)
22 - Rr = 2.9e-3; %rotor resistance referred to stator
23 - Ls= Lm + Lsi; % stator inductance
24 - Lr = Lm + Lsi; % rotor inductance
25 - Vbus = Vr_stator*sqrt(2); % DC bus voltage referred to stator (V)
26 - sigma= 1- Lm^2/(Ls*Lr); %

27 - Fs = Vs*sqrt(2/3)/(2*pi*f); % stator flux (aprox) (Wb)
28
29 - J= 127/2 ; % inertia
30 - D= 1e-3;
31
32 - fsw= 4e3;
33 - Ts= 1/fsw/50;
34
35 - %%Pi regulators
36
37 - tau_i = (sigma*Lr)/Rr;
38 - tau_n = 0.05;
39 - wni = 100*(1/tau_i);
40 - wnn = 1/tau_n;
41
42 - kp_id = (2*wni*sigma*Lr)-Rr;
43 - kp_iq = kp_id;
44 - ki_id = (wni^2)*Lr*sigma;
45 - ki_iq = ki_id;
46 - kp_n = (2*wnn*J)/p;
47 - ki_n = ((wnn^2)*J)/p;
48
49 - %%Three blade wind turbine model
50 - N= 100 ; %Gearbox ratio
51 - Radio= 42 ; %Radio
52 - ro= 1.225 ; %Air density
```

```

53
54 %cp and ct curves
55
56 - beta=0; %pitch angle
57 - ind2=1;
58
59 - for lambda=0.1:0.01:11.8
60 -     lambdai(ind2) = (1./((1./lambda-0.02.*beta)+(0.003./(beta^3+1 ))));
61 -     cp(ind2)= 0.73.*(151./lambdai(ind2)-0.58.*beta-0.002.*beta ^2.14-13.2).*(exp(-18.4./lambdai(ind2)));
62 -     ct(ind2)=cp(ind2)/lambda ;
63 -     ind2=ind2+1 ;
64 - end
65 - tab_lambda=[0.1:0.01:11.8];
66
67 %kopt for mppt
68
69 - cp_max = 0.44;
70 - lambda_opt =7.2 ;
71 - kopt = ((0.5*ro*pi*(Radio^5)*cp_max)/(lambda_opt^3));
72
73 %% Power curve in function of wind speed
74
75 - P = 1.0e+06 *[0,0,0,0,0,0,0,0.0472,0.1097,0.1815,0.2568,0.3418,...
76 -     0.4437,0.5642,0.7046,0.8667,1.0518,1.2616,1.4976,1.7613,2.0534,...
77 -     2.3513,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024];
78 - V= [0.0000,0.5556,1.1111,1.6667,2.2222,2.7778,3.3333,3.8889,4.4444,...
79 -     5.0000,5.5556,6.1111,6.6667,7.2222,7.7778,8.3333,8.8889,9.4444,...
80 -     10.0000,10.5556,11.1111,11.6667,12.2222,12.7778,13.3333,13.8889,...
81 -     14.4444,15.0000];
82
83
84 - figure
85 - subplot(1,2,1)
86 - plot(tab_lambda,ct,'linewidth',1.5)
87 - xlabel('lambda','fontsize',14)
88 - ylabel ('ct' , 'fontsize',14)
89 - subplot (1,2,2)
90 - plot(V,P, 'linewidth',1.5)
91 - grid
92 - xlabel ('wind speed (m/s)', 'fontsize' ,14)
93 - ylabel ('power (w)','fontsize' ,14)

```

Bibliographie

- [1] Sathyajith Mathew, «Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics», livre, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [2] Adam MIRECKI, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse le 05 avril 2005.
- [3] Youcef Himri, « Optimisation de certains paramètres d'un aérogénérateur situé au sudouest », mémoire de magister, université de Bechar, année 2005.
- [4] Munif JOURIEH, «Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien», thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers le 20 décembre 2007.
- [5] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01448219/document>.
- [6] Mekkaoui Naïma, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », mémoire de magister, Université de Batna, année 2004.
- [7] Mayouf Messaoud, «contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents», mémoire de magister, université de Biskra, année 2008.
- [8] Ameziane Sadek « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien », mémoire de magister, Université de Batna, Soutenu le 01/07/2009.
- [9] Haritza Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Soutenu le 18 décembre 2003.
- [10] S. Heier, «Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems», Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [11] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, «Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, BM 4 640.
- [12] Khetta Laid, « Etude et Commande d'un système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée », mémoire de magister, Université de Batna, année 2007.

- [13] <https://www.connaissancedesenergies.org/le-point-sur-le-developpement-du-parc-eolien-mondi210427#>.
- [14] Carbone, R. (2009) Grid-connected photovoltaic systems with energy storage. Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, June 9–11, 2009, pp. 760–767.
- [15] DrOuahiba GUERRI Maitre de Recherche Classe A Directrice de la Division Energie Eolienne.
- [16] Elbia Youcef, « Commande fluée optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté », mémoire de magister, université de Batna, Soutenu le 15/06/2009.
- [17] <https://www.google.com/search?q=Une+machine&oq=Une+machine&aqs=chrome..69i57j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>.
- [18] SALMA EL AIMANI, « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Co habilité avec l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1 (USTL), décembre 2004.
- [19] G. SEGUIER, « Electrotechnique industrielle », éditions TEC & DOC, pp 513-514. 2002.
- [20] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications and design", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58408-8.
- [21] L. Refoufi, B.A.T. Al Zahawi, A.G. Jack "Analysis and modelling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, Issue 3, 1999, pp 333-339.
- [22] G.A. Smith, K.A. Nigim, "Wind-energy Recovery by a Static Scherbius Induction Generator", Proc. IEE, 1981, 128, pp. 317-324.
- [23] N. abu-tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon 200.
- [24] Busquets-Monge, S., Rocabert, J., Rodríguez, P. et al. (2008) Multilevel diode-clamped converter for photovoltaic generators with independent voltage control of each solar array. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55 (7), 2713–2723.
- [25] Kerekes, T., Teodorescu, R., Liserre, M. et al. (2009) Evaluation of three-phase transformerless photovoltaic inverter topologies. IEEE Transactions on Power Electronics, 24 (9), 2202–2211.
- [26] M. Loucif, A. Boumediene and A. Mechernene, « Backstepping Control of Double Fed

Induction Generator Driven by Wind Turbine ». Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control, Algiers, Algeria, October 29-31, 2013IEEE.

[27] Negroni, J.J., Guinjoan, F., Meza, C. et al. (2006) Energy-sampled data modeling of a cascade H-bridge multilevel converter for grid-connected pv systems. 10th IEEE International Power Electronics Congress, Puebla, October 16–18, 2006, pp. 1–6.

[28] Carbone, R. (2009) Grid-connected photovoltaic systems with energy storage. Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, June 9–11, 2009, pp. 760 767.