

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des sciences de l'ingénieur

Année 2009

Département d'Electromécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal

Option : électromécanique

Présenté par :

Mr : Meghlaoui Issam

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Benretem Abdelouabab M.C U.ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT: Haddouche Ali Prof U.ANNABA

EXAMINATEURS: Saad Salah M.C U.ANNABA

Cheikchouk Nassir M.C U.ANNABA

Ouadi Mohamed M.C U.ANNABA

Remerciements & Dédicaces

Qu'il me soit d'abord permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers Dieu de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'étude.

Je tiens à remercier Mr Benretem Abdelouahab pour avoir accepté de m'encadrer, je lui exprime par la présente toute ma gratitude pour la confiance qu'il m'a prodiguée, pour ses encouragements continus, pour le suivi de près de mon travail et pour ses qualités humaines.

Je n'oublie pas de présenter mes remerciements les plus sincères aux membres du jury : Dr Haddouche.A, Dr cheikchouk.N, Dr Saad.S, Dr Ouadi.M, pour l'intérêt qu'ils ont apporté à mon travail.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes professeurs tout le long de ces années d'études.

Je voudrais aussi remercier tout les membres de ma famille, mes chers parents mes chers frères :Ilyes Oussama et Zakaria et mes chère grands mères Zhaira Khadouja et Hafsia mon oncle Faouzi et sa femme et sa petite tesnim . Mes tantes et mes cousins et cousines.

Je remercie, tout particulièrement, Mr Abdessemed Rachid professeur de l'université de Batna, pour ses conseils judicieux pour son expérience, sa compétence, et pour ses qualités humaines.

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

Mes chers parents.

Mes chers frères.

Ma chère Hanane et la petite Tesnim.

Résumé

Parallèlement au marché important de la génération éolienne de forte puissance, se développent des systèmes de petite puissance (quelques 100 W à quelques kW) surtout dédié aux sites isolés.

Les chaînes de conversion d'énergie sont alors très différentes de celles de grande puissance, elles sont souvent fondées sur l'utilisation d'une génératrice triphasée à aimants permanents débitant directement, à travers un redresseur à diodes, vers un onduleur de tension.

L'étude présente une modélisation de cette chaîne de conversion, peu conventionnelle, en vue de la simulation comportementale du système complet sur le plan mécanique, électrique et énergétique pour différentes vitesses et différents profils de vent.

Les comparaisons énergétiques à des profils et vitesses de vents variables ont alors permis d'évaluer les différentes structures et stratégies de pilotage.

Abstract

In the same market for wind high power generation, are developing systems for smaller-capacity (some 100 W to several kW) mainly for remote sites. Energy conversion systems are very different from those of high power; they are often based on using a triphase permanent magnet generator supplying an inverter through a diode rectifier.

The study presents a model of the conversion system, and it's simulation concerning the whole mechanical system, electrical and energetic behavior for different speeds and winds profiles.

Energetic comparisons with strong profiles of variable wind speeds were used to evaluate the different structures and drive strategies

Sommaire

Sommaire

Résumé

Liste des figures

Liste des symboles

Introduction générale

1 Etat de l'art sur les systèmes éoliens

1.1 Introduction.....	3
1.2 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....	3
1.2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	3
2.2 Principaux composants d'une éolienne.....	5
1.3 Les différents types d'éoliennes.....	7
1.3.1 Eolienne à axe horizontal.....	7
1.3.2 Eolienne à axe vertical.....	8
1.4 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	9
1.4.1 Loi de Betz.....	9
1.4.2- Production d'énergie mécanique.....	12
1.4.3-Production optimale d'énergie.....	13
1.5 Chaînes de conversion électromécanique.....	15
1.5.1 Systèmes couplés au réseau alternatif.....	15
1.5.1.1 Génératrices asynchrones à cage.....	15
1.5.1.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA).....	16
1.5.1.3 Génératrices synchrones.....	17
1.5.2 Systèmes non couplés au réseau alternatif.....	18
1.5.3 Le petit éolien	19
1.5.4 Eolien urbain.....	20
1.5.5 Architectures pour le petit éolien ilotables et maximisation de la puissance.....	20
1.6 Structure retenue pour notre étude	23
1.7 Conclusion.....	23

2 Modélisation et simulation du vent et de la turbine	24
2.1 Introduction.....	24
2.2 Modèle du vent	24
2.2.1 Carte de vent en Algérie	25
2.2.2 Bloc de simulation du vent.....	26
2.2.3 Résultat de la simulation du vent.....	26
2.3 Modélisation de la turbine.....	27
2.3.1 Bloc de simulation de la turbine éolienne.....	31
2.3.2 Paramètres utilisés dans la simulation	31
2.3.3 Résultats de la simulation.....	31
2.4 Conclusion.....	38
3 Modélisation et simulation de la génératrice et du convertisseur statique	39
3.1 Introduction	39
3.2 Caractérisation de la machine.....	39
3.3 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	40
3.3.1 Modèle mathématique de la GSAP dans le référentiel généralisé	40
3.3.2 Modèle biphasé de la GSAP dans le référentiel généralisé.....	41
3.3.3 Modélisation biphasé en charge de la GSAP.....	43
3.3.4 Expressions du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique.....	43
3.3.5 Bloc de simulation de la GSAP.....	44
3.3.6 Paramètre de simulation	44
3.3.7 Résultats de la simulation en charge.....	45
3.4 Convertisseur statique.....	47
3.4.1 Pont de diodes.....	47
3.4.1.1 Modèle du redresseur à diodes.....	47
3.4.1.2 Rappel sur les règles de conduction d'une diode.....	47
3.4.1.3 Modèle du redresseur monophasé à diode.....	48
3.4.1.4 Modélisation et simulation d'un pont de diode sans prise en compte de l'empiétement.....	49
3.4.1.5 Bloc de simulation du pont de diode.....	51
3.4.1.6 Paramètre de simulation du redresseur.....	51
3.4.1.7 Résultats de simulation.....	52

3.4.2 Onduleur de tension	53
3.4.2.1 Modélisation des onduleurs de tension.....	53
3.4.2.2 Contrôle du courant par M.L.I.....	55
3.4.2.3 MLI à échantillonnage naturel.....	56
3.4.2.4 Bloc de simulation de l'onduleur de tension.....	57
3.4.2.5 Paramètre de simulation.....	57
3.4.2.6 Résultat de simulation.....	58
3.5 Conclusion	60
4 Modélisation et simulation du système complet	61
4.1 Introduction.....	61
4.2 Difficulté de modélisation du système complet.....	61
4.3 Modélisation de la chaîne éolienne.....	62
4.3.1 Bloc de simulation du système complet.....	63
4.3.2 Paramètres de simulation.....	63
4.3.3 Résultat de la simulation du système complet	63
4.3.3.1 Influence du profil du vent sur les paramètres mécaniques de la chaîne.	64
4.3.3.2 Influence du profil du vent sur les paramètres énergétiques de la chaîne	68
4.3.3.3 Influence du profil du vent sur les paramètres électriques de la chaîne...	70
4.4 Conclusion.....	76
Conclusion générale	77
Annexe	79
Références bibliographiques	80

Liste des figures

Figure 1.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure 1.2 : Composante d'une éolienne	6
Figure 1.3 : Eolienne à axe horizontal (Modèle Fortis Montana).....	7
Figure 1.4 : Eolienne de type Darrieus (Wind Wall).....	8
Figure 1.5 : Eolienne de type Savonius (Wind Side).....	9
Figure 1.6 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.....	10
Figure 1.7: Coefficient de puissance.....	11
Figure 1.8 : Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales.....	11
Figure 1.9 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	13
Figure 1.10: Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.....	14
Figure 1.11 : Interface d'électronique de puissance.....	14
Figure 1.12 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)...	15
Figure 1.13 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.....	16
Figure 1.14 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation- régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation.....	17
Figure 1.15 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents.....	18
Figure 1.16 : Système basé sur la machine synchrone et redresseur à diodes.....	18
Figure 1.17 : Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu.....	19
Figure 1.18 : Structure éolienne à base d'un redresseur à MLI.....	21
Figure 1.19 : Structure éolienne à base d'un hacheur en aval du pont de diodes.....	21
Figure 1.20 : Structure éolienne retenue dans notre étude.....	21

Figure 2.1 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie.....	25
Figure 2.2 : Bloc de simulation de la vitesse du vent.....	26
Figure 2.3 : Evolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s) « profil du vent réel ».....	26
Figure 2.4 : Entrées – sorties du modèle de la voilure.....	27
Figure 2.5 : Courbe caractéristique retenue pour notre étude.....	27
Figure 2.6 : Variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent ($C_p=0,43$ $R=1m$).....	28
Figure 2.7 : Variation de la puissance en fonction du rayon de la pale ($C_p=0,43$ $V_{vent}=9m/s$)..	29
Figure 2.8 : Schéma bloc d'une turbine éolienne.....	30
Figure 2.9 : Schéma de modèle dynamique de la turbine.....	30
Figure2.10 : Bloc de simulation de la turbine éolienne.....	31
Figure 2.10 : Vitesse du vent constante (m/s).....	32
Figure 2.11 : Vitesse du vent variable (m/s).....	32
Figure 2.12 : Coefficient de puissance C_p de la turbine « avec V_v constant ».....	33
Figure 2.13 : Coefficient de puissance C_p de la turbine « avec V_v variable ».....	33
Figure 2.14 : Coefficient λ de la turbine« avec V_v constant »	34
Figure 2.15 : Coefficient λ de la turbine« avec V_v variable ».....	34
Figure 2.16 : Couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec V_v constant ».....	35
Figure 2.17 : Couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec V_v variable ».....	35
Figure2.18: Vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec V_v constant ».....	36
Figure2.19 : Vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec V_v variable ».....	36
Figure2.20: Puissance mécanique de la turbine ($watt$) « avec V_v constant ».....	37
Figure2.21: Puissance mécanique de la turbine ($watt$) « avec V_v variable ».....	37

Figure 3.1 : Schéma représentatif de la GSAP.....	40
Figure 3.2 : Représentation schématique des enroulements de la GSAP selon (d, q).....	42
Figure 3.3 : Bloc de simulation de la génératrice synchrone à aimant permanent.....	44
Figure 3.4 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), « $ts=0.5s$ ».....	45
Figure 3.5 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), « $ts=0.05s$ ». Zoom	45
Figure 3.6: Evolution des courants des phases i_a, i_b, i_c (A). « $ts=0.05s$ ».....	46
Figure 3.7 : Evolution des courant directe et quadrature $i_d ; i_q$ (A).....	46
Figure 3.8: Redresseur monophasé à diode.....	47
Figure 3.9: Bloc de simulation d'un redresseur monophasé débitant sur une charge inductive...	49
Figure 3.10 : Schéma d'un pont de diodes.....	49
Figure 3.11: Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale.....	50
Figure 3.12 : Modèle de simulation d'un pont de diodes en conduction normale sous Matlab/Simulink..	51
Figure 3.13 : Evolution de la tension continue à la sortie du pont de diode (V).....	52
Figure 3.14 : Evolution du courant continue à la sortie du pont de diode (V).....	52
Figure 3.15: Schéma de l'onduleur triphasé.....	53
Figure3.16 : Schéma synoptique d'un MLI.....	55
Figure3.17 : M.L.I à échantillonnage naturel.....	56
Figure 3.18 : Bloc de simulation de l'onduleur de tension.....	57
Figure3.19 : Tension a la sortie de l'onduleur V_{an} (V).....	58
Figure3.20 : Tension a la sortie de l'onduleur V_{bn} (V).....	58
Figure3.21 : Tension a la sortie de l'onduleur V_{cn} (V).....	59

Figure 4.1 : Représentation de caractère multi physique.....	61
Figure 4.2 : Chaîne de conversion éolienne.....	62
Figure 4.3 : Synoptique du modèle instantané implanté sous Matlab /Simulink.....	63
Figure 4.4 : Evolution du couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec V_v constant ».....	64
Figure 4.5 : Evolution du couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec V_v variable ».....	64
Figure 4.6 : Evolution du couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec profil de vent réel »....	65
Figure 4.7: Evolution de la vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec V_v constant ».....	66
Figure 4.8: Evolution de la vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec V_v variable ».....	66
Figure 4.9: Evolution de la vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec profil de vent réel »	67
Figure 4.10: Evolution de la puissance mécanique de la turbine ($watt$) « avec V_v constant ».....	68
Figure 4.11: Evolution de la puissance mécanique de la turbine ($watt$) « avec V_v variable».....	68
Figure 4.12: Evolution de la puissance mécanique de la turbine ($watt$) «avec profil de vent réel »	69
Figure 4.13 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), «avec V_v constante».....	70
Figure 4.14 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), «avec V_v variable ».....	70
Figure 4.14 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), «avec profil de vent réel ».....	71
Figure 4.16 : Evolution de la tension continue à la sortie du pont de diode (V) «avec V_v constante ».....	72
Figure 4.17 : Evolution de la tension continue à la sortie du pont de diode (V) «avec V_v variable ».....	72
Figure 4.18 : Evolution de la tension continue à la sortie du pont de diode (V) «Avec profil de vent réel ».....	73
Figure 4.19 : Tension à la sortie de l'onduleur V_{an} (V) «avec V_v constante ».....	74
Figure 4.20 : Tension à la sortie de l'onduleur V_{an} (V) «avec V_v variable».....	74
Figure 4.21 : Tension à la sortie de l'onduleur V_{an} (V) «Avec profil de vent réel ».....	75

Liste des symboles

V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
ρ	densité de l'air
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
P_m	Puissance extraite par le rotor éolien
P_{mt}	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse relative de l'éolienne
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
Ω	Vitesse de rotation de la génératrice
P_{mg}	Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice
\vec{V}	Vecteur vitesse du vent
f	Fréquence du réseau électrique
R	Rayon de la turbine
Γ_e	Couple électromagnétique
R_s	Résistances des enroulements
Ψ_f	flux efficace des aimants
L_s	Inductance synchrone
J_m	Inertie de la machine
f_m	Coefficient de frottements
P	opérateur de la place
$C_{méc}$	Couple mécanique
J_t	Inertie de la turbine
f_t	Coefficient de frottement de la turbine
t_s	Temps de simulation
x_a, x_b, x_c	Valeurs instantanées des grandeurs triphasées
x_d, x_q	Valeurs instantanées des grandeurs biphasées
x_0	composante homopolaire
θ	L'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé
R_{ch}	Résistance de la charge
L_d	L'inductance sur l'axe d
L_q	L'inductance sur l'axe q
L_{ch}	Inductance de la charge

P	Nombre de pôles
t_s	Temps de la simulation
V_L	Tension aux bornes de l'inductance
V_{AK}	Tension anode-cathode
i_{AK}	Le courant anode-cathode
i_a, i_b et i_c	Les courants des phase (a,b,c)
I_{dc}	Courant continu
V_{dc}	Tension du bus continue
v_a, v_b et v_c	Les tensions des phase (a,b,c)
MSAP	Machine synchrone à Aimant Permanent
C.D.E.R	Centre de Développement des Energies Renouvelable
MLI	Modulation de la largeur d'impulsion
EDF	Electricité De France
GSAP	Génératrice Synchrone à Aimant Permanent
MPPT	Maximum Power Point Tracking

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles.

Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire.

Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Longtemps négligées ces énergies reprennent la place qui leur est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires. [18]

Dans ce contexte général, cette présente étude s'intéresse à la filière éolienne, qui semble être l'une des plus prometteuses.

Même si les énergies fossiles (pétrole et gaz) ne vont pas être remplacées de sitôt par les énergies renouvelables en Algérie, la part de ces derniers ne cesse d'augmenter, depuis la création du commissariat aux énergies renouvelables en 1982, et l'élaboration récente des textes législatifs, loi sur les énergies renouvelables, en 2004.

L'option du recours aux énergies renouvelables a pris un essor certain en Algérie, elle reste à être matérialisée par des projets importants et concrets.

Des centrales hybrides solaire éolien peuvent être envisagées en Algérie, vu le potentiel solaire très important dont nous disposons, le pompage éolien peut aussi être très rentable, non seulement dans la région très ventée d'Adrar, mais aussi à travers toute la steppe Algérienne. [18]

Notre travail s'intègre dans le domaine de petite éolienne, nous allons dans ce mémoire aborder la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal

Le présent mémoire comporte quatre chapitres.

Le premier chapitre est un état de l'art sur les systèmes éoliens il se divise en deux parties :

La première partie rappelle les notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien et les équations qui s'y rapportent ainsi que les différents types d'aérogénérateur. Les stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable,) sont également décrites.

La seconde partie présente les différentes chaînes de conversion électromécaniques (machines + convertisseurs) permettant de transformer l'énergie mécanique présente sur l'arbre de l'éolienne en énergie électrique. Cette partie permet également d'annoncer les orientations des chapitres suivants notamment sur la configuration électrotechnique qui y sera étudiée

Le second chapitre a fait l'objet de la modélisation du vent et de la turbine éolienne à axe horizontal. Les modèles mathématiques de ces deux dernières ont été développés, la turbine éolienne est par la suite simulée pour deux profils du vent différents.

Le troisième chapitre traite la chaîne de conversion électromécanique qui comporte le générateur synchrone à aimant permanent et le convertisseur statique qui comporte un redresseur à diode et un onduleur à MLI, ces derniers ont été modélisés et simulés dans l'environnement Matlab/simulink,

Le quatrième chapitre s'intéresse au système complet, les différents éléments constituant la chaîne de conversion d'énergie éolienne sont rassemblées, le système complet par la suite sera modélisé et simulé dans l'espace Matlab /simulink, pour différents profils de vent.

Notre travail se termine par des références bibliographiques et une conclusion générale.

Chapitre 1

Etat de l'art sur les systèmes éoliens

1.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [01]. 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.

1.2 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

1.2.1 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure 1.1).

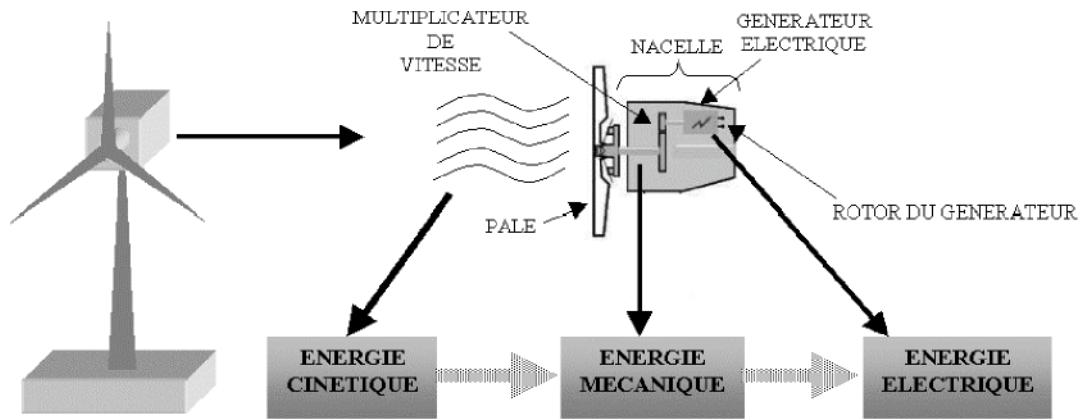


Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [23]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences[02].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. On distingue deux grands types d'éoliennes :

Les éoliennes à axe vertical : ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au

démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [02].

Les éoliennes à axe horizontal : beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [03].

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

2.2 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

- **Le mât (la tour)**, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).

- **La nacelle**, regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

- **Le rotor**, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit[w.win] .

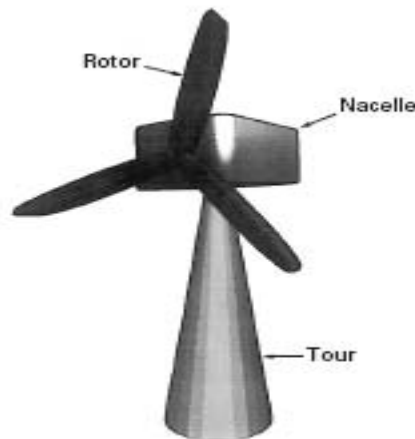


Figure1.2 : composante d'une éolienne [4].

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écurie) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

1.3 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

1.3.1 Eolienne à axe horizontal

Elles sont similaires aux éoliennes que l'on rencontre actuellement sur les fermes éoliennes. Les caractéristiques des éoliennes à axe horizontal sont les suivantes : de petite taille, de 5 à 20 m avec un diamètre compris entre 2 et 10 m, et avec une production pouvant aller jusqu'à 20 kW



Figure 1.3 : Eolienne à axe horizontal (Modèle Fortis Montana) [17]

1.3.2 Eolienne à axe vertical

Elles ont été conçues pour s'adapter au mieux avec les contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain comme décrit ci-dessus. Grâce à ce design, elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et sont moins soumises à ces perturbations que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont relativement silencieuses et peuvent facilement s'intégrer au design des bâtiments. Leurs faiblesses résident principalement dans la faible maturité du marché (coûts d'investissement élevés) et leur coefficient de puissance inférieur à celui offert par les turbines à axe horizontal. En raison de leur petite taille, l'énergie produite reste faible. Ces éoliennes trouvent donc leur place essentiellement dans le milieu urbain

Eolienne à axe horizontal ou à axe vertical ?

En milieu urbain, la vitesse du vent et sa direction sont imprévisibles, surtout près des bâtiments. Là où la turbulence ne peut être évitée, les éoliennes à axe vertical peuvent plus facilement capter le vent. D'autre part, les éoliennes peuvent être classées selon leur caractéristique aérodynamique, c'est-à-dire fonctionnant avec un design utilisant la portance ou la traînée. Les éoliennes à axe horizontal fonctionnent avec la portance alors que les éoliennes à axe vertical utilisent soit la traînée (Savonius) soit la portance (Darrieus).

L'éolienne de modèle Darrieus se caractérise par la forme en C de ces pales qui rappelle vaguement un batteur. Elle est normalement constituée de deux ou trois pales. L'éolienne utilise l'effet de la portance. Il existe différents types de machine utilisant ce principe : conique, cylindrique ou parabolique. L'éolienne peut être fixée par des haubans. L'éolienne Wind Wall est un exemple de machine Darrieus alors que le modèle Turby est connu pour être basé sur un design Darrieus modifié.



Figure 1.4 : Eolienne de type Darrieus (Wind Wall) [17]

L'éolienne de modèle Savonius utilise la traînée différentielle entre les aubes constituées de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s ($\lambda \sim 0.5$). Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence. De plus, ce design ne fait pas beaucoup de bruit et finalement convient bien au milieu urbain. En revanche, ce concept est fortement pénalisé par son coefficient de puissance ($C_p \text{ max} \sim 0.2$)



Figure 1.5 : Eolienne de type Savonius (Wind Side) [17]

En conclusion, en terme de coûts, les éoliennes à axe horizontal sont à l'heure actuelle moins chères que les éoliennes à axe vertical et connaissent également de meilleurs rendements énergétiques. Cependant, les éoliennes à axe horizontal posent quatre problèmes qui sont moins cruciaux pour les éoliennes à axe vertical : le bruit, les vibrations, la sécurité, l'orientation du flux éolien et sa variation.

1.4 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

1.4.1 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (1.6) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $(V_1 + V_2)/2$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1):

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 - V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.3)$$

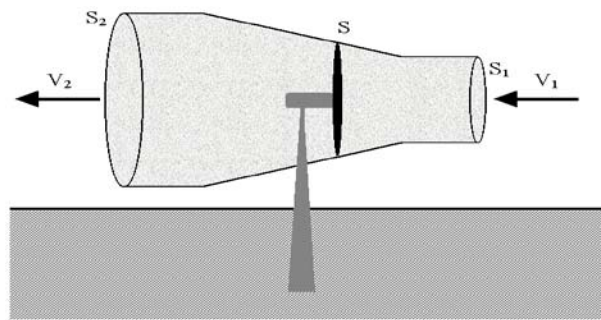


Figure 1.6: Tube de courant d'air autour d'une éolienne [23]

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure 1.11), on s'aperçoit que la relation P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un Maximum de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

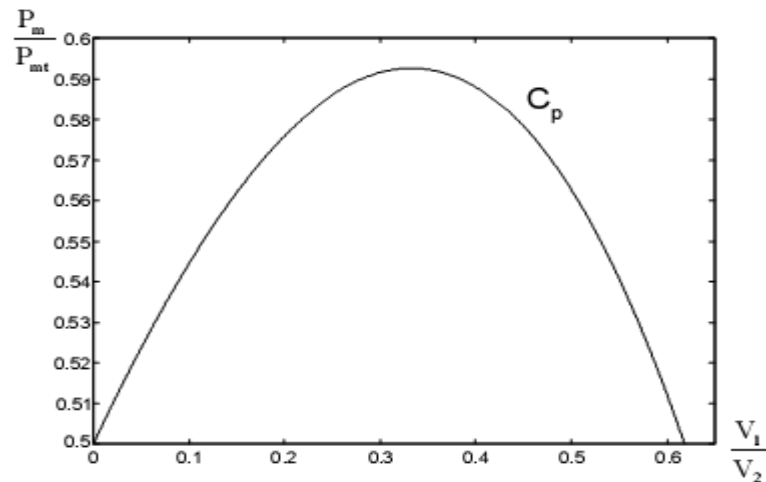


Figure 1.7 : Coefficient de puissance [23]

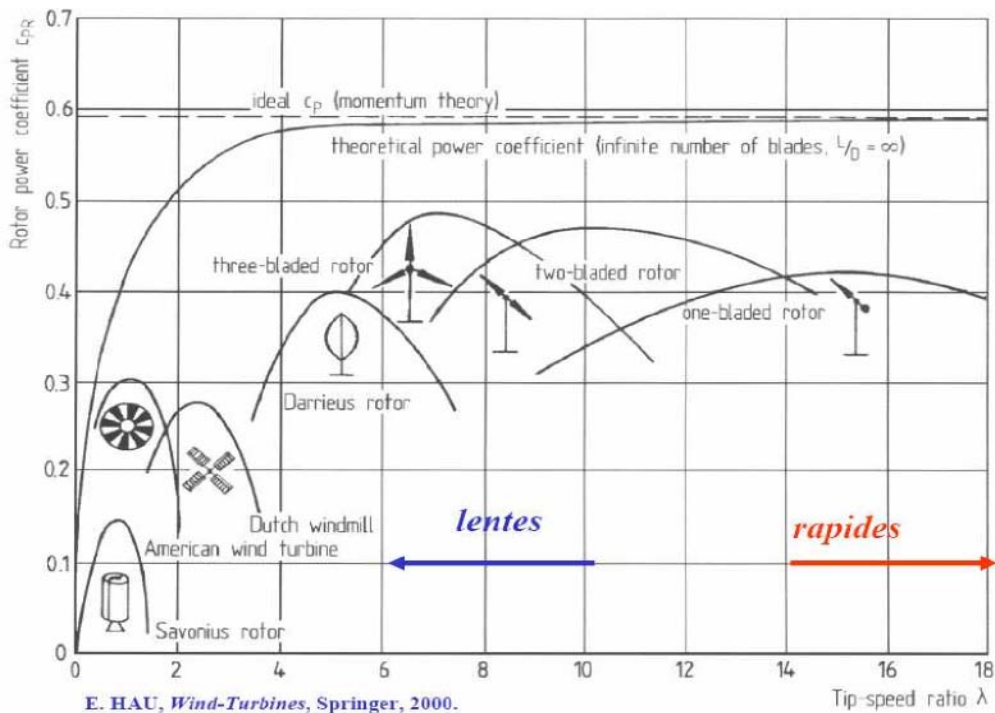


Figure 1.8 : Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales [05]

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure 1.8) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure 1.8) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [Hei98].

1.4.2 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.6)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (1.7)$$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur et R : rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{KV_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.8)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure 1.9) [06].

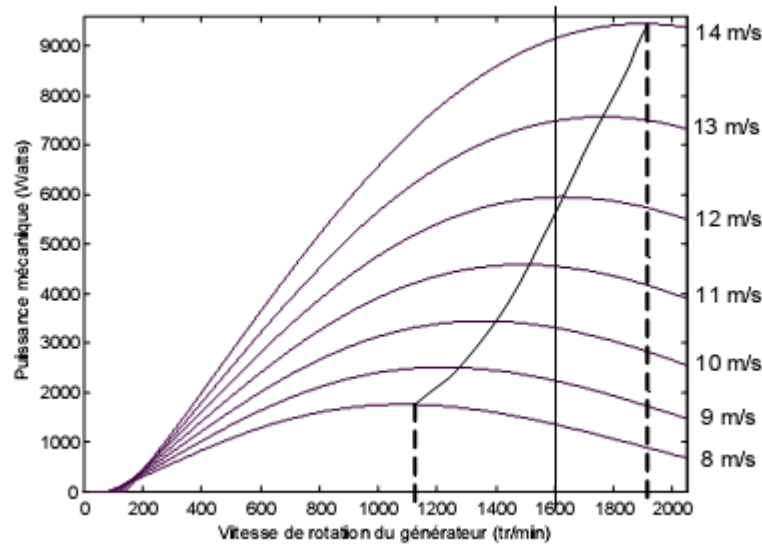


Figure 1.9 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné [23]

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la figure (1.9)) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

1.4.3 Production optimale d'énergie

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la figure(1.9). Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} Résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot v \quad (1.9)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone **II** de la figure (1.10) [07]. La zone **I** correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone **III** correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

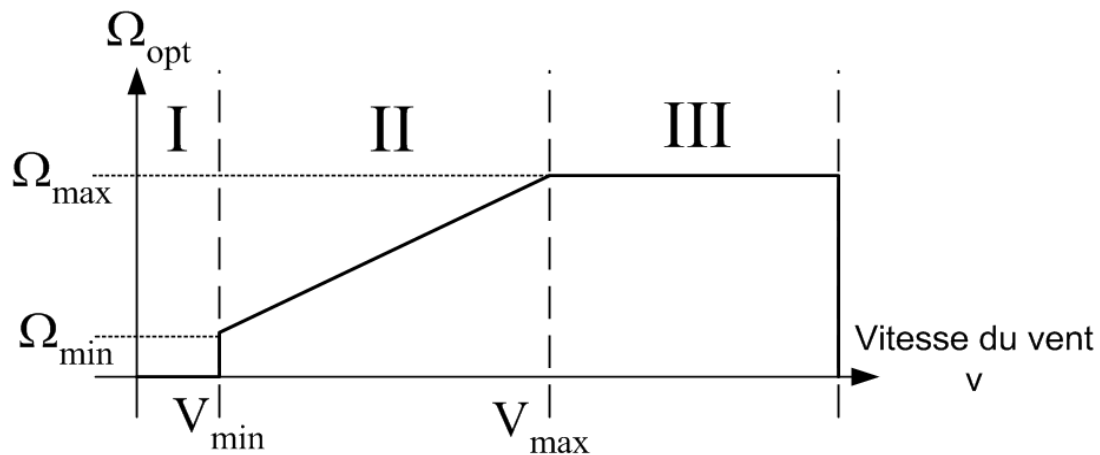


Figure 1.10: Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable [23]

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau (Figure 1.11). Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivré par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.

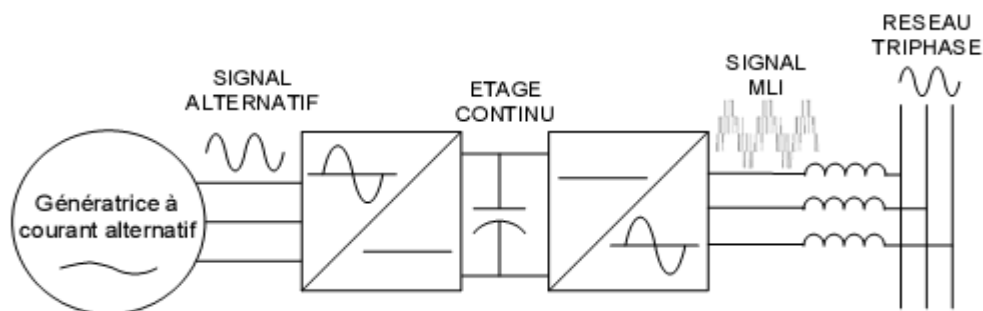


Figure 1.11 : interface d'électronique de puissance [23]

1.5 Chaînes de conversion électromécanique

Diverses chaînes de production coexistent pour la production d'électricité par aérogénérateurs. Elles peuvent être très différentes selon que l'on est en forte ou en petite puissance, en fonctionnement à vitesse fixe (ou peu variable) ou à vitesse variable. On peut, par exemple, classer ces solutions par leur fonctionnement couplé ou non au réseau.

1.5.1 Systèmes couplés au réseau alternatif

1.5.1.1 Génératrices asynchrones à cage

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau (sans interface électronique de puissance) jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse comme le montre la figure (1.12).

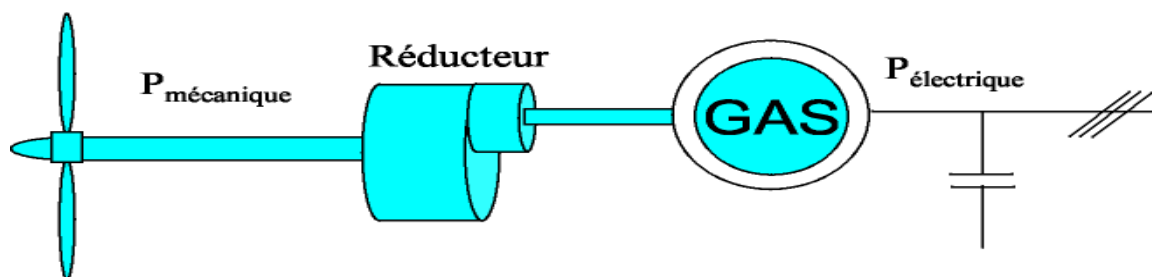


Figure 1.12 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe) [08]

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée Figure (1.13)

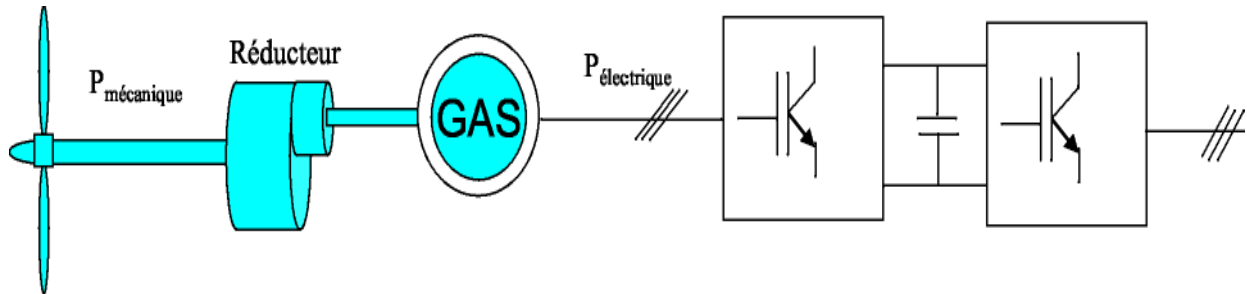


Figure 1.13 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable [09]

1.5.1.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit.

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa...) utilisent ce type de machine.

Une des solutions très intéressantes et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau (Figure 1.14). En général, le dimensionnement de la chaîne rotorique se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation de 30% de la plage de vitesse. Ceci constitue le principal avantage de cette structure. Par contre son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau.

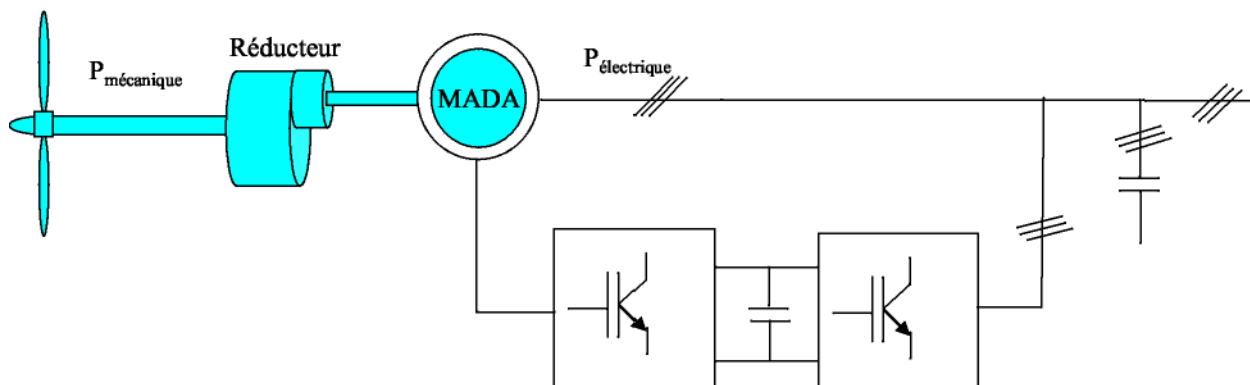


Figure 1.14 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation- régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation [09]

1.5.1.3 Génératrices synchrones

Enfin, tout particulièrement dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des machines synchrones. Leurs performances, notamment en terme de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles. Leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable.

Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses. Le principal fabricant est Enercon (plusieurs milliers de machines de 300 kW, 600 kW, 1 MW et 1.8 MW sont déjà en service). L'inducteur (rotor) est bobiné nécessite un système bagues lisses-balais ou un système à diodes tournantes sans contact (comme dans les « alternateurs classiques » de production) pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI.

Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent (Jeumont Industrie, 750 kW) et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années (voire Figure 1.15).

On trouve également des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, comme chez le constructeur Made (gamme au-delà de 800 kW). Ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel ils sont connecté comme le montre la figure (1.16).

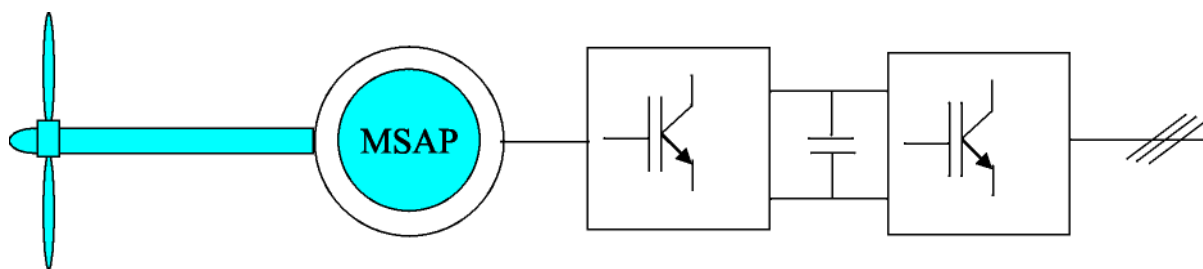


Figure 1.15 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [09]

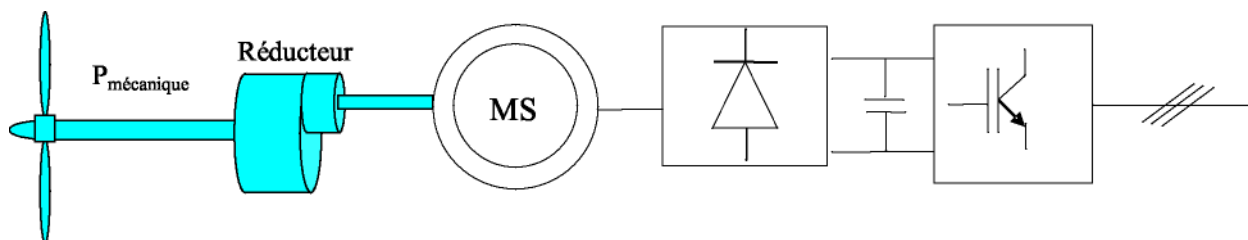


Figure 1.16 : Système basé sur la machine synchrone et redresseur à diodes [17]

De nos jours, dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne, l'intérêt se porte sur l'utilisation de génératrices électriques tournant à basse vitesse sans multiplicateur. Celui-ci est en effet une source de bruit et de pannes fréquentes.

1.5.2 Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petites puissances en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et est auto amorcée par condensateurs [10]. Pour éviter des démarrages trop fréquents du groupe électrogène, ou pour assurer les transitions, des batteries électrochimiques, voire des accumulateurs inertiels, peuvent également être associés via un convertisseur électronique. Les inconvénients principaux de ce type de chaîne sont dus à la rigidité (vitesse faiblement variable par glissement de la GAS), l'absence d'optimisation de puissance et la nécessité d'un multiplicateur de vitesse [11].

Une autre solution couramment employée consiste à utiliser un bus continu intermédiaire avant de transformer l'énergie en courant alternatif. Dans le cas des très petites puissances, l'énergie est directement consommée en courant continu. Le bus continu présente l'avantage d'interconnecter plus aisément divers systèmes de production (éolien, photovoltaïque, pile à combustible...) et des batteries électrochimiques qui peuvent se trouver directement en tampon sur de tels bus [12].

La figure (1.17) montre une solution originale et de faible coût pour associer un aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique.

Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à l'inductance d'induit de la machine synchrone de forte valeur que les courants restent proches des formes sinusoïdales et que les rendements de conversion sont corrects. En cas de surcharge de la batterie (trop de tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation.

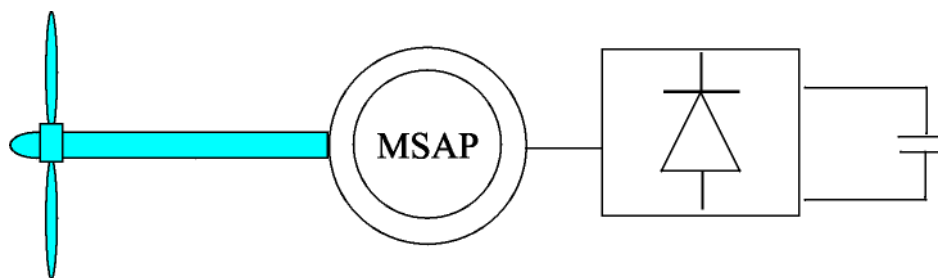


Figure 1.17 : Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu [13].

Pour de faibles rayons de pales, les rotors tournent suffisamment vite pour que la conception des générateurs reste classique. Cependant, comme nous le montrons ci - dessous, une conception de la génératrice dédiée à l'application est nécessaire, selon la turbine et la chaîne de conversion d'énergie utilisées [11] .

1.5.3 Le petit éolien

Le petit éolien, ou éolien individuel ou encore éolien domestique, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances, de 100 watts à 20 kilowatts, montées sur des mâts de 10 à 35 mètres, raccordées au réseau ou bien autonomes en site isolé. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques (pompes, éclairage, ...) de manière économique et durable, principalement en milieu rural. Par exemple, une petite éolienne accompagnée d'un module solaire photovoltaïque et d'un parc de batteries peut garantir l'autonomie énergétique d'un voilier (éclairage, instruments de bord...). L'élément essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable est le vent, qui doit être à la fois puissant et fréquent. Les petites éoliennes classiques sont généralement à axe horizontal. Elles comprennent le plus souvent deux à trois pales et développent une puissance électrique de 100 watt à 20 kW. Elles sont fabriquées soit par des professionnels (AWP, Bergey, Eoltec, Lakota, Vergnet, South West Wind power, Wind side, ...), soit en auto construction.

1.5.4 Eolien urbain

Eolien urbain est un nom générique pour les systèmes de production d'énergie éolienne spécialement adaptés à l'environnement urbain. Si tout le monde connaît les éoliennes classiques (une grande hélice sur un mât), l'éolien urbain est une technologie émergente. L'environnement urbain est particulièrement difficile pour la production d'énergie éolienne : vent turbulent avec des variations rapides et localisées de vitesse et de direction, sites d'implantation difficiles d'accès et peu adaptés à l'installation d'une éolienne (ancrages...). Mais le potentiel est important (tous les toits des bâtiments par exemple) et la production est proche de l'utilisation [13].

1.5.5 Architectures pour le petit éolien ilotables et maximisation de la puissance

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

On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT en anglais pour Maximum Power Point Traking). Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales ou bien encore de jouer sur la commande de la génératrice pour adapter l'impédance de charge.

Dans le cas des systèmes de petite puissance (de 100 W à quelques kW) surtout dédiés aux sites isolés, les chaînes de conversion d'énergie sont alors très différentes de celles de grande puissance. Elles sont souvent basées sur l'utilisation d'un alternateur triphasé à aimants permanents multipolaires, à entraînement direct (sans multiplicateur mécanique), débitant à travers une chaîne de puissance plus ou moins complexe sur un accumulateur électrochimique généralement basse tension.

Dans cette gamme de puissance, la génératrice peut tout d'abord débiter sur une batterie à travers un redresseur à MLI (voire Figure 1.18). Cette structure permet d'assurer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice, ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation et ainsi, d'effectuer par ce biais une recherche de la puissance maximale souhaitée. En revanche, elle est assez coûteuse et complexe à mettre en œuvre: elle nécessite en effet des capteurs électrique et mécanique ainsi qu'un convertisseur statique et d'un dispositif de commande onéreux.

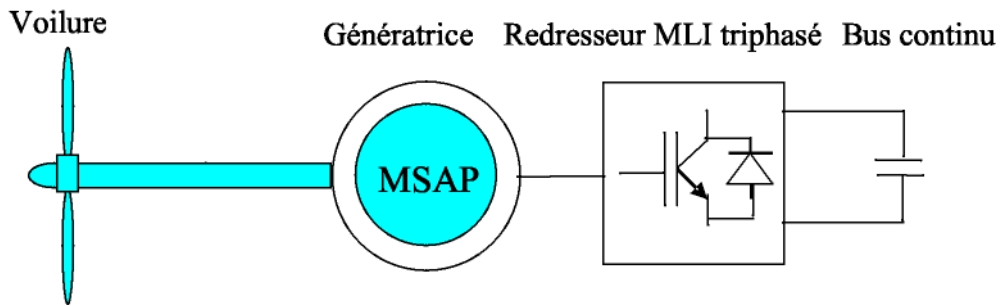


Figure 1.18 : Structure éolienne à base d'un redresseur à MLI [17]

On trouve également une autre structure plus simple, qui consiste à redresser le courant alternatif par un pont de diodes et à intercaler un hacheur entre le pont de diodes et la batterie (Figure 1.19). La présence d'un hacheur permet un contrôle indirect de la puissance transitée autorisant ainsi un fonctionnement en MPPT. Ce dernier est obtenu en contrôlant le courant de charge qui débite dans une batterie selon le point de fonctionnement de l'éolienne.

Contrairement à la structure décrite précédemment, le contrôle de la charge mécanique de la voilure s'effectue de façon indirecte à travers le pont de diode. Cependant, cette structure quoique simplifiée peut s'avérer encore trop coûteuse en petit éolien, car elle nécessite deux capteurs (courant, tension DC), deux convertisseurs statiques et une loi de commande.

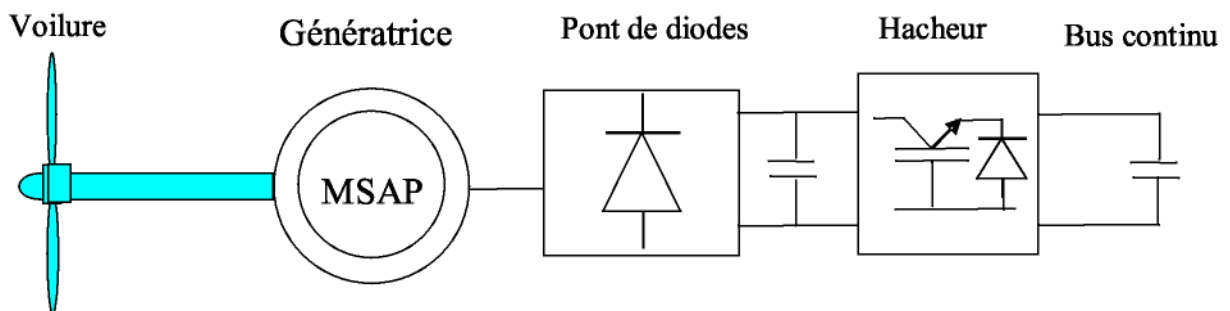


Figure 1.19 : Structure éolienne à base d'un hacheur en aval du pont de diodes [15]

Les deux structures précédentes ont été étudiées au LAPLACE dans le cadre de la thèse d'Adam Mirecki [16] dédiée au contexte du petit éolien, ces chaînes de puissance ont été associées à une voilure axe vertical de type Savonius développée par l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT).

Afin de minimiser le coût du système, on peut en petit éolien rechercher la structure la plus simple possible, basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont de diodes comme indiqué Figure 1.17. Cette structure a été proposée et analysée par Gergaud dans sa thèse [13]. Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est clairement minimal. La fiabilité de cette « chaîne entièrement passive » est également très appréciable dans le contexte applicatif que nous visons, à savoir le petit éolien.

Par contre, cette chaîne présente un inconvénient majeur au niveau de l'efficacité énergétique qui peut s'avérer assez modeste si l'association turbine génératrice- accumulateur n'est pas mutuellement adaptée.

Cependant plusieurs travaux d'Adam Mirecki [13] ont montré que cette structure pourrait être efficace du point de vue énergétique si un choix judicieux de ses paramètres (électriques et géométriques) est réalisé. En d'autres termes, cela signifie qu'en supprimant toute commande MPPT, on peut obtenir une récupération de l'énergie du vent quasi-optimale.

Cette structure est un exemple concret de système de conversion d'énergie complexe, car elle est composée de plusieurs sous systèmes appartenant à plusieurs domaines physiques très différents (aérodynamique, mécanique, électrique, thermique....) en forte interaction.

L'existence d'un couplage fort entre les différents éléments de cette structure nécessite de considérer le système dans sa globalité, plutôt que d'examiner les différents organes séparément.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés par la modélisation du système de conversion d'énergie dans sa globalité.

1.6 Structure retenue pour notre étude

Pour notre étude nous nous sommes intéressés par la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne à axe horizontale qui comporte une turbine tripale associée à un générateur synchrone à aimant permanent débitant sur un convertisseur statique composé d'un redresseur à diode puis un onduleur de tension. Le schéma du système est présenté sur la figure 1.20.

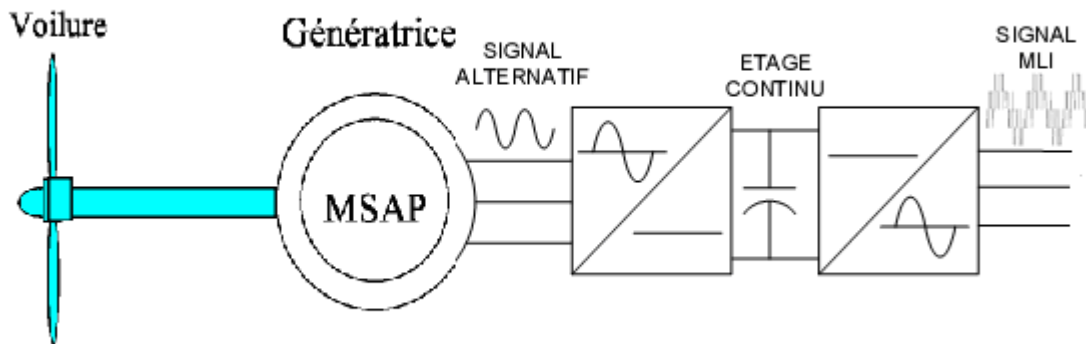


Figure 1.20 : structure éolienne retenue dans notre étude

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art des systèmes éoliens a été présenté. La théorie des aérogénérateurs et leur principe de fonctionnement ainsi que les différents types ont été abordés en détail.

Nous avons abordé aussi les différentes architectures couramment utilisées dans les systèmes éoliens de petite puissance, ainsi que les différentes méthodes de commande et de contrôle employées pour améliorer leur efficacité énergétique. Dans cette gamme de puissance, un intérêt particulier est porté sur une structure éolienne passive qui présente de grands avantages aux niveaux, du coût, de la sûreté de fonctionnement et de fiabilité.

Dans le chapitre suivant, nous allons proposer un modèle du vent et nous aborderons en détail la modélisation de la turbine éolienne tripale à axe horizontal.

Chapitre 2

Modélisation et simulation du vent et de la turbine

2.1 Introduction

Pour avoir un modèle globale de la chaîne de conversion, il est nécessaire de modéliser chaque élément constituant ce système individuellement.

Dans ce chapitre nous allons proposer un modèle du vent qui va être la source d'énergie qui entraînera notre turbine, La turbine tri pale qui récupère l'énergie du vent et la transforme en énergie mécanique disponible sur le rotor sera par la suite modélisée et simulée.

2.2 Modèle du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent [17].

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar.

Les travaux effectués par les chercheurs du C.D.E.R D'Alger montrent à l'évidence que le pompage éolien peut être pratiqué à travers la steppe et le désert Algérien. La faisabilité économique de l'utilisation de l'énergie éolienne dans notre pays est à présent réelle et effective et est confirmée par l'expérience [18].

2.2.1 Carte de vent en Algérie

La figure (2.1) présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne [18].

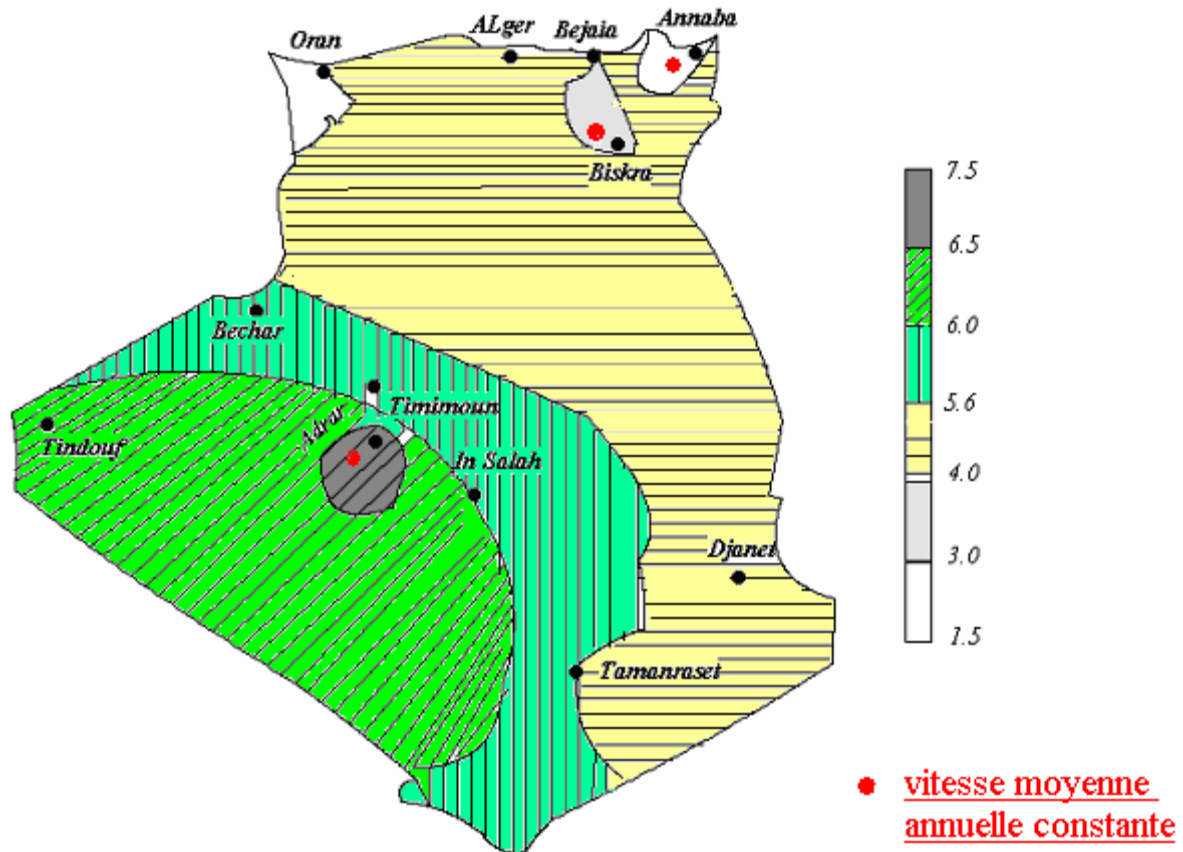


Figure 2.1 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie [18]

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V_v = f(t)$$

La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques : [17].

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t))$$

$$V_v(t) = 9 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t)$$

2.2.2 Bloc de simulation du vent

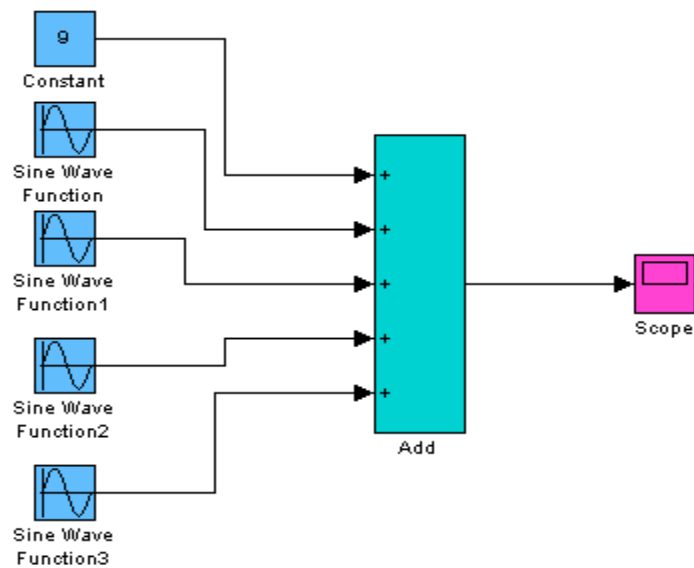


Figure 2.2 : Bloc de simulation de la vitesse du vent.

2.2.3 Résultat de la simulation du vent

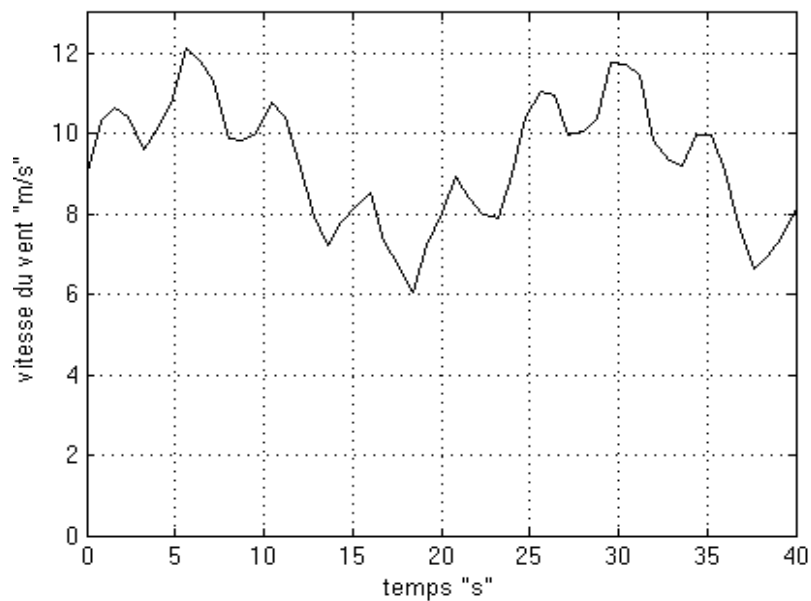


Figure 2.3 : évolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s) « profil du vent réel »

La figure (2.3) montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (40s) entre deux valeurs ($V_v=12m/s$) comme valeur maximale et ($V_v=6m/s$) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

Il est à signaler que ce profil de vent particulier correspond à des mesures effectuées par EDF sur le site du canal des dunes. Ce profil temporel sera exploité pour notre cas d'étude.

2. 3 Modélisation de la turbine

La voilure éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Un modèle prenant en compte toutes ces propriétés n'est à l'heure actuelle pas envisageable. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique.

Une voilure éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique.

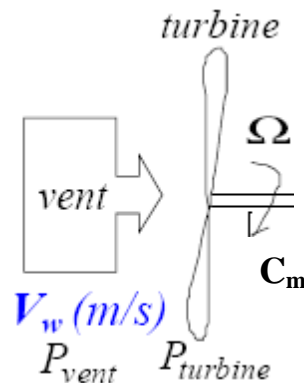


Figure 2.4 : Entrées – sorties du modèle de la voilure.

La courbe caractéristique de la voilure utilisée dans notre cas d'étude est présentée sur la figure (2.5).

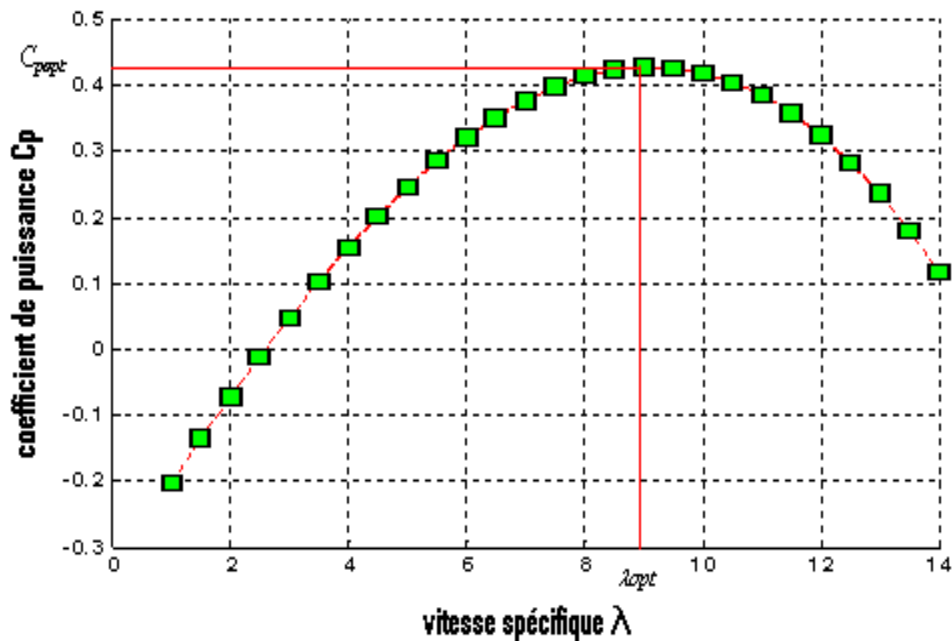


Figure 2.5 : Courbe caractéristique retenue pour notre étude.

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent. Il peut avantageusement s'exprimer en fonction de λ , la vitesse spécifique ou normalisée. λ est le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_v} \quad (2.1)$$

On remarque que la caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure est représentée par un polynôme de troisième degré sous la forme :

$$C_p(\lambda) = a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3\lambda^3 + a_4 \quad (2.2)$$

Dans notre cas et pour $\beta=0$ les différents coefficients valent [23] :

$$a_1 = 0.144713492$$

$$a_2 = -0.003986905$$

$$a_3 = -0.000286111$$

$$a_4 = -0.342590476$$

L'équation algébrique de cette courbe ainsi que ses points remarquables, respectivement vitesse réduite optimale, coefficient de puissance maximal sont données par :

$$C_p(\lambda) = 0.144713492\lambda - 0.003986905\lambda^2 - 0.000286111\lambda^3 - 0.342590476 \quad (2-3)$$

$$\lambda_{opt} = 8.5$$

$$C_{popt} = 0.43$$

Selon la caractéristique propre de la voilure $C_p(\lambda)$, la puissance éolienne est donnée par la

formule :

$$P_{eol} = P_m = \frac{1}{2} \pi \rho C_p(\lambda) R^2 V_v^3 \quad (2.4)$$

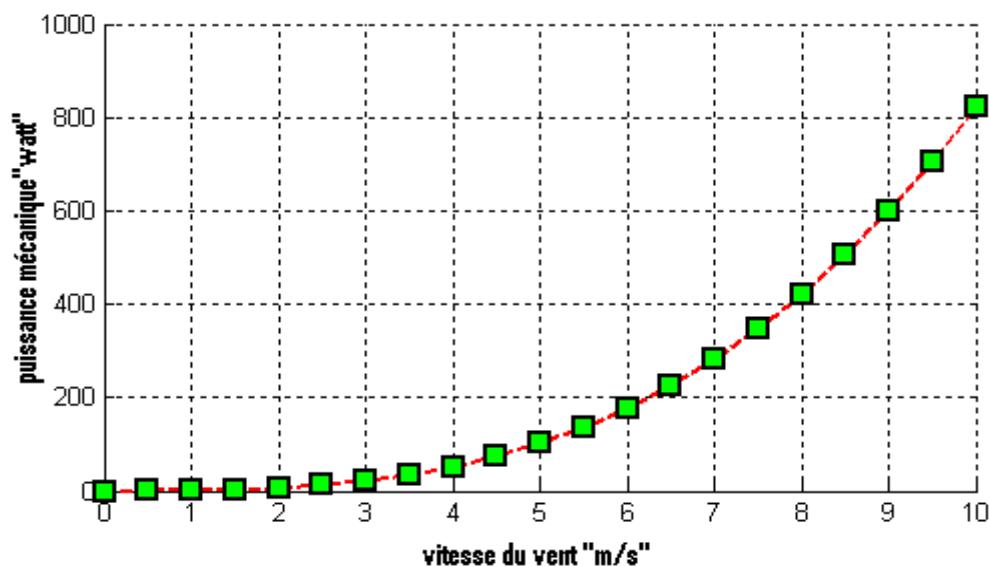


Figure 2.6 variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent
($C_p=0,43$ $R=1m$)

Pour avoir une puissance mécanique de 400 à 600 watt il faut avoir une vitesse de vent limiter entre 8 et 9 m/s, d'après la courbe de la figure (2.6).

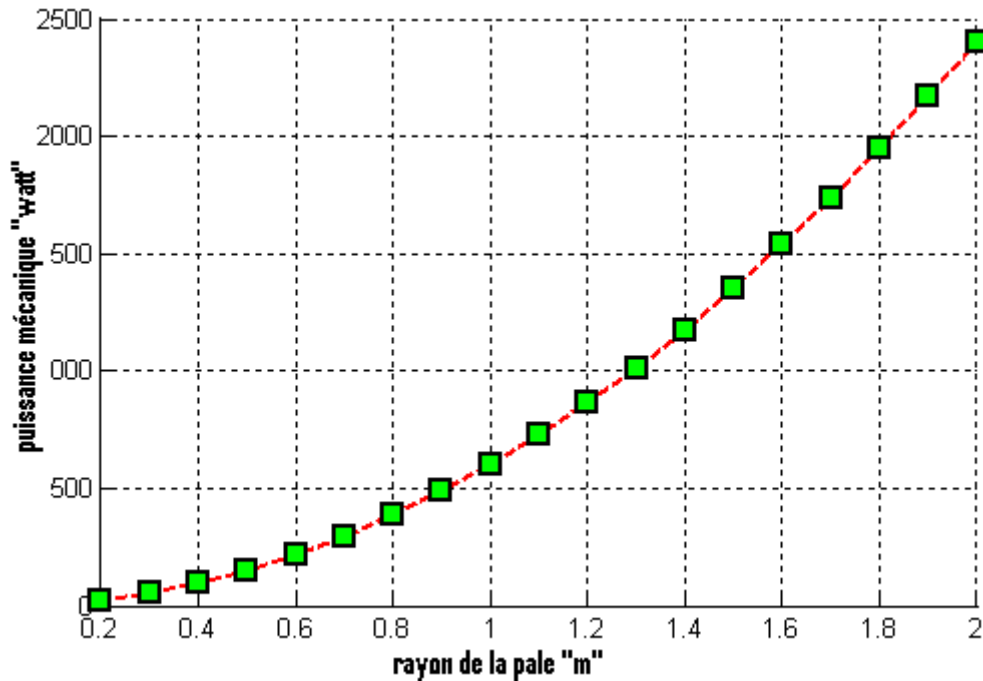


Figure 2.7 variation de la puissance en fonction du rayon de la pale

$$(C_p=0,43 \quad V_{vent}=9m/s)$$

La puissance récupérer par la turbine est directement lier a ça taille comme le montre la courbe de la figure (2.7)

A partir de cette puissance, et en faisant abstraction dans un premier temps de l'inertie de voilure, le modèle le plus basique consiste à supposer un fonctionnement quasi-statique en mode générateur de couple éolien C_{eol} .

Une équation du générateur de couple éolien est donc obtenue en remplaçant la valeur de la puissance par le produit couple – vitesse et en utilisant l'expression (2-1) de la vitesse réduite :

$$C_{eol} \approx C_{méc} = \frac{1}{2} \pi \rho \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} R^3 V_v^2 \quad (2.5)$$

L'équation (2-5) donne la valeur du couple éolien qui est créé sur les pales de la voilure par la masse d'air ayant une vitesse V_v et à la vitesse de rotation de la voilure Ω . En réalité ce couple éolien n'est pas égal au couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine ($C_{eol} = C_{méca}$) surtout à cause de l'inertie conséquente de la turbine J et, dans une moindre

mesure, des frottements mécaniques f des paliers comme présenté schématiquement sur la figure (2.8).

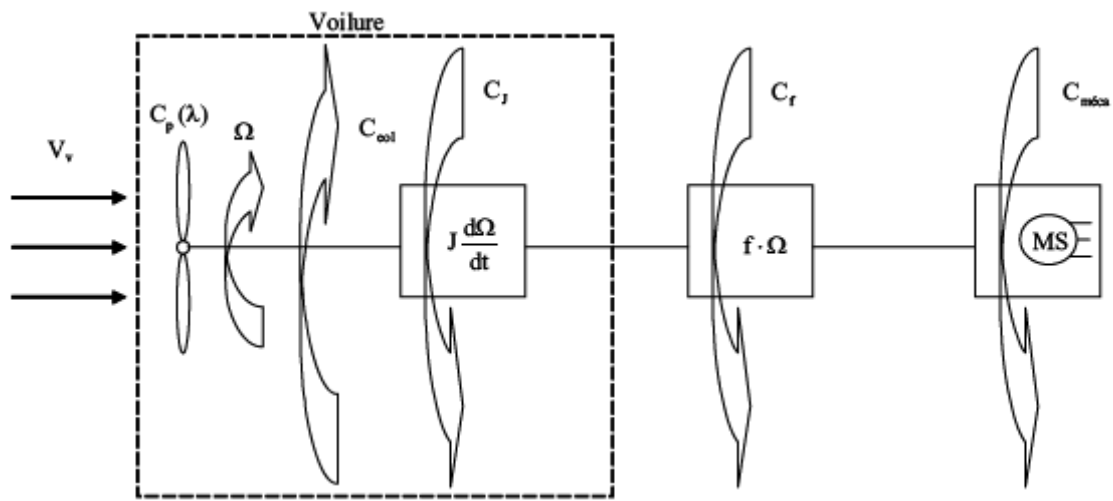


Figure 2.8 : Schéma bloc d'une turbine éolienne [16]

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$\Delta C = C_{eol} - C_{méc} = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \tag{2.6}$$

D'où, après le réarrangement des termes, la valeur de la vitesse obtenue par :

$$\Omega = \frac{1}{J} \int (\Delta C - C_f) dt$$

$$\text{Où : } C_f = f \Omega$$

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine éolienne basé sur cette équation est donné par la figure (2.9) :

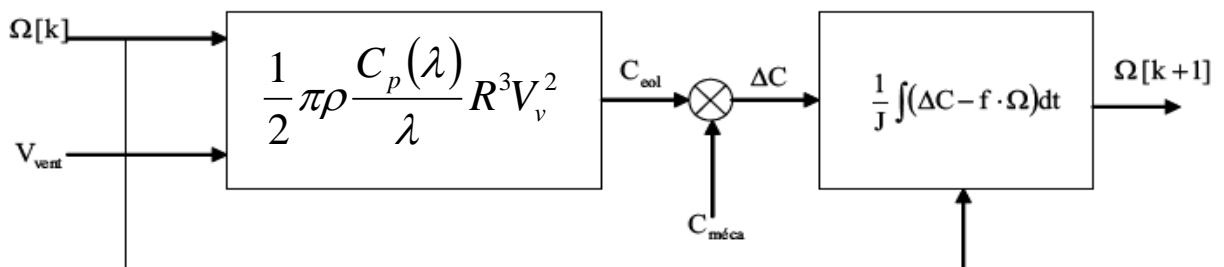


Figure 2.9 : Schéma de modèle dynamique de la turbine

2.3.1 Bloc de simulation de la turbine éolienne

Pour la simulation de la turbine il suffit d’implanter le model mathématique de la turbine sous l’environnement Matlab/Simulink.

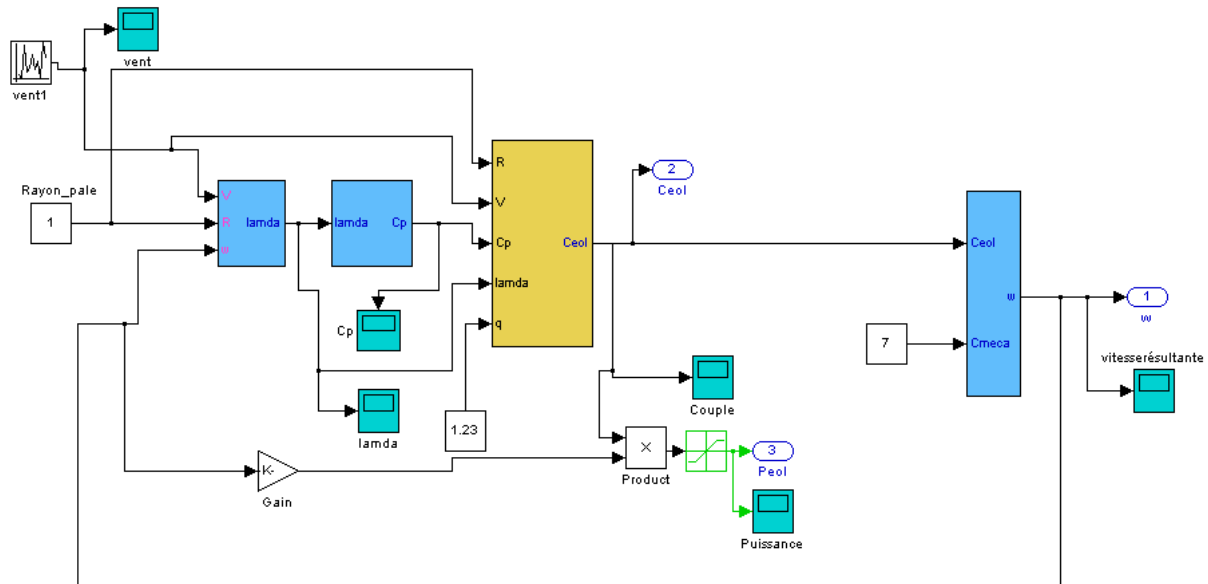


Figure2.10 : bloc de simulation de la turbine éolienne

2.3.2 Paramètres utilisés dans la simulation

Rayon de la turbine $R = 1\text{ m}$

La masse volumique de l’air $\rho = 1.23\text{ Kg/m}^3$

Couple mécanique $C_{mec} = 7\text{ N.m}$

Inertie de la turbine $J = 0.05\text{ Kg.m}^2$

Coefficient de frottement de la turbine $f = 0.155\text{ N.m.s/rad}$

Temps de simulation $ts = 10\text{ s}$

2.3.3 Résultats de la simulation

Pour la simulation de la turbine éolienne on considère deux cas :

a -vitesse de vent constante

Dans ce cas là on suppose que la vitesse du vent est constante ($V_v = 9\text{ m/s}$)

b -vitesse de vent variable

Dans ce cas là on suppose que la vitesse du vent est variable et on utilisant un vent de vitesse ($9 \pm 1\text{ m/s}$) (voir figure (2.11)).

Les résultats sont présentés sur les figures ci-dessous :

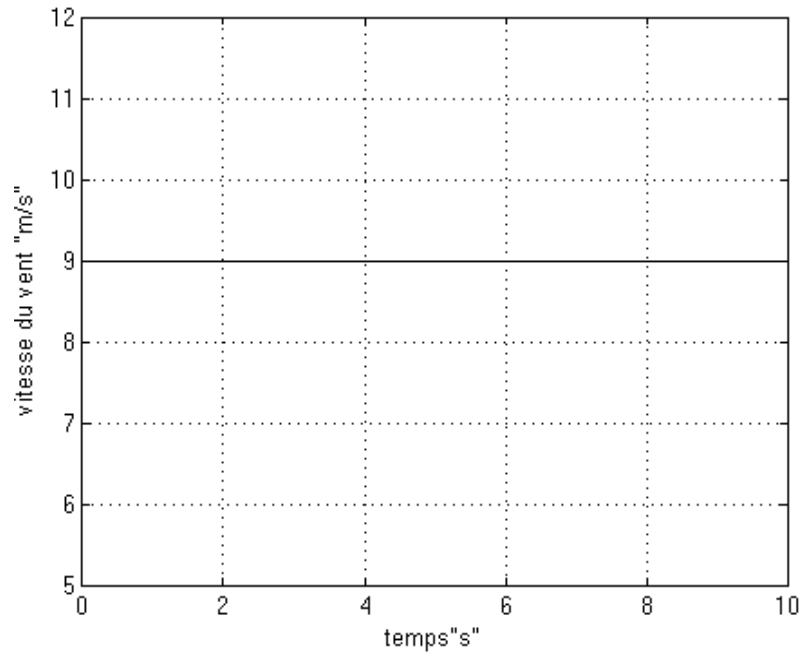


Figure 2.10 : vitesse du vent constante (m/s).

La figure (2.10) montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps, et comme on a supposé que la vitesse du vent est constante de valeur 9 m/s , on a délivré un signal invariant et constant à la valeur précitée.

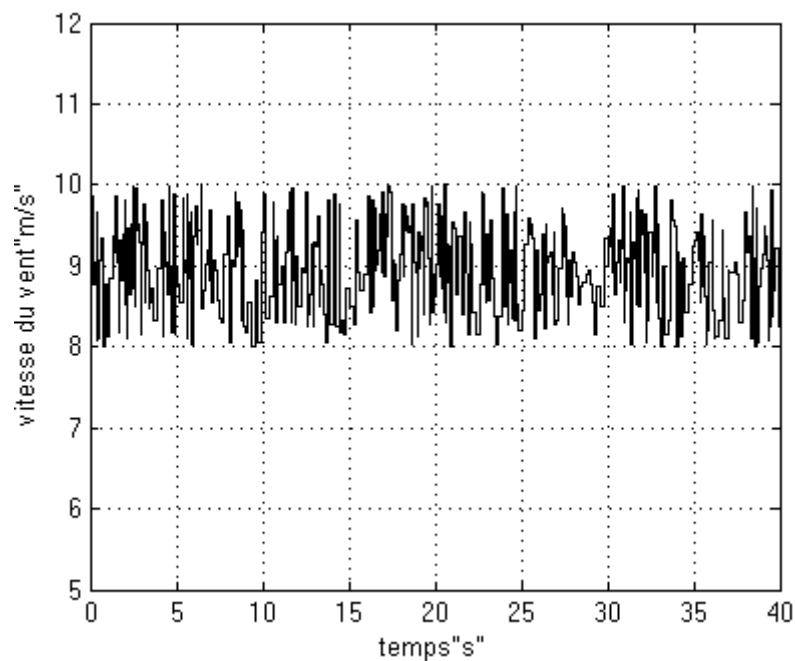


Figure 2.11 : vitesse du vent variable (m/s).

La figure (2.11) montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps, avec un caractère chaotique, la vitesse du vent varie entre (8 et 10 m/s).

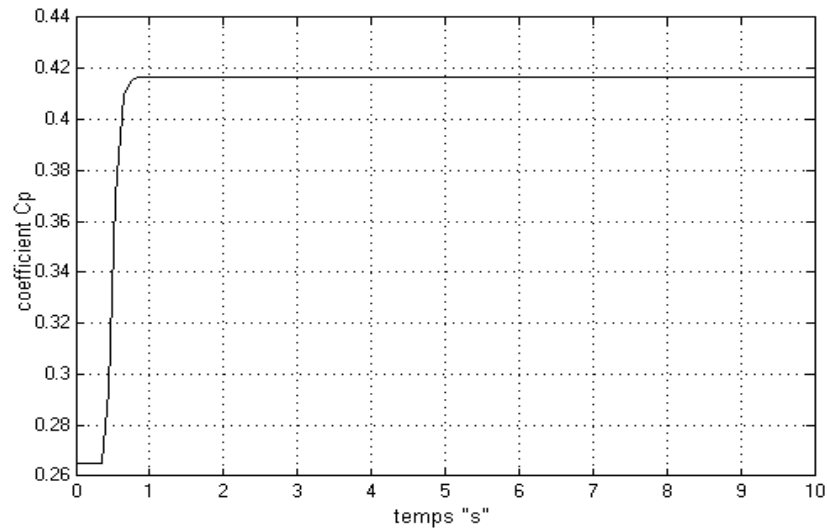


Figure 2.12 : coefficient de puissance C_p de la turbine « avec V_v constant ».

La figure (2.12) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction du temps pour un vent de vitesse constante ($V_v=9m/s$), l'allure de la courbe prend une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine qui dure ($t_d=0.8s$), puis il se stabilise à la valeur ($C_p \approx 0,42$). On peut conclure que la turbine récupère 42 % de la puissance du vent.

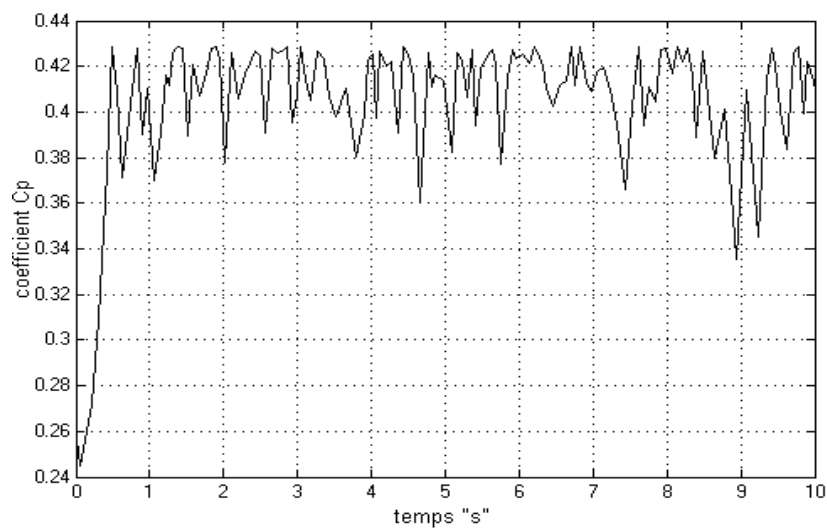


Figure 2.13 : coefficient de puissance C_p de la turbine « avec V_v variable ».

La figure (2.13) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, le coefficient C_p prend toujours une forme d'allure croissante pendant le temps de démarrage, puis il se met à osciller autour de la valeur ($C_p=0.41$) ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient C_p de la turbine.

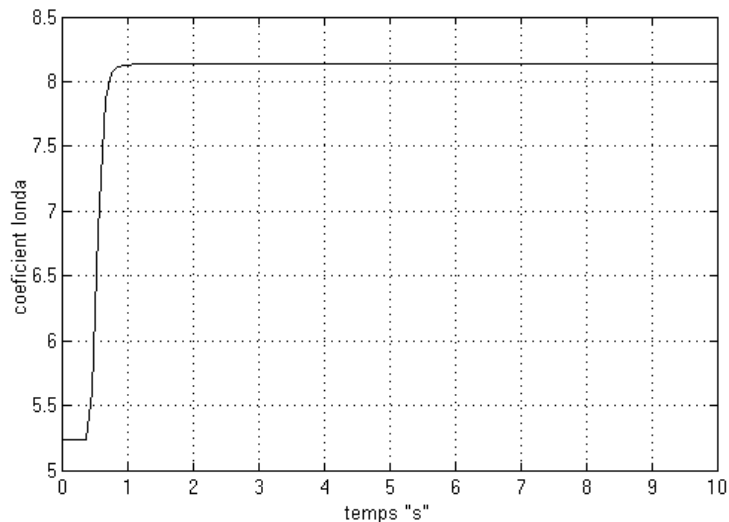


Figure 2.14 : coefficient λ de la turbine « avec V_v constant ».

La figure (2.14) montre l'évolution du coefficient λ en fonction du temps pour un vent de vitesse constante ($V_v=9m/s$), l'allure de la courbe prend une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine qui dure ($t_d=0.8s$), puis il se stabilise à la valeur ($\lambda =8,2$). On peut conclure que la vitesse de la turbine égale à 8 fois la vitesse du vent.

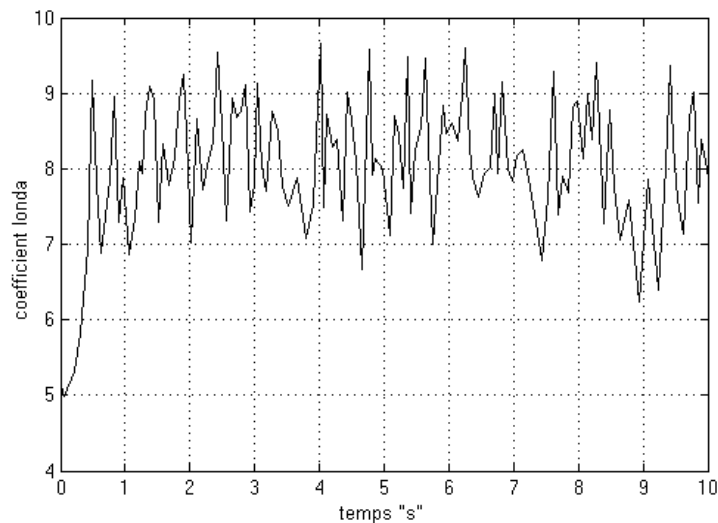


Figure 2.15 : coefficient λ de la turbine « avec V_v variable ».

La figure (2.15) montre l'évolution du coefficient λ en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable; l'allure de la courbe prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ($\lambda=8$) ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient λ de la turbine.

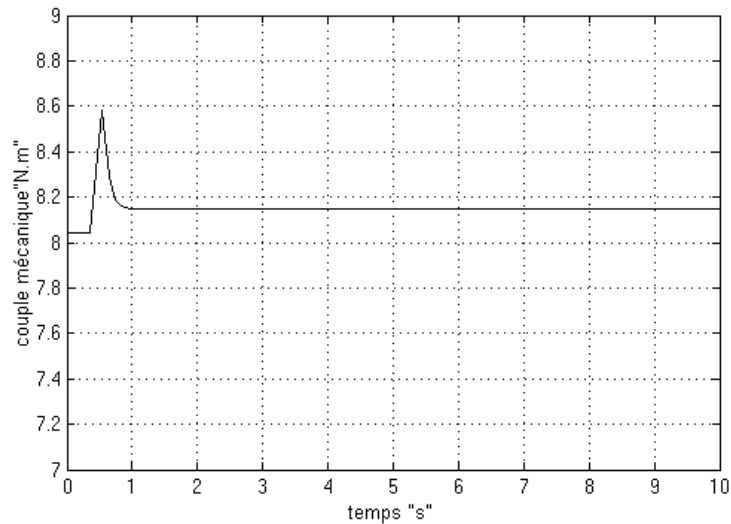


Figure 2.16 : couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec V_v constant ».

La figure (2.16) montre l'évolution du couple mécanique de la turbine en fonction du temps pour un vent de vitesse constante ($V_v=9m/s$), l'allure de la courbe prend une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine qui dure ($t_d=0.8s$) et il présente un pic de couple de ($C_{eol}=8.6N.m$), puis il se stabilise à la valeur ($C_{eol}\approx 8.2N.m$).

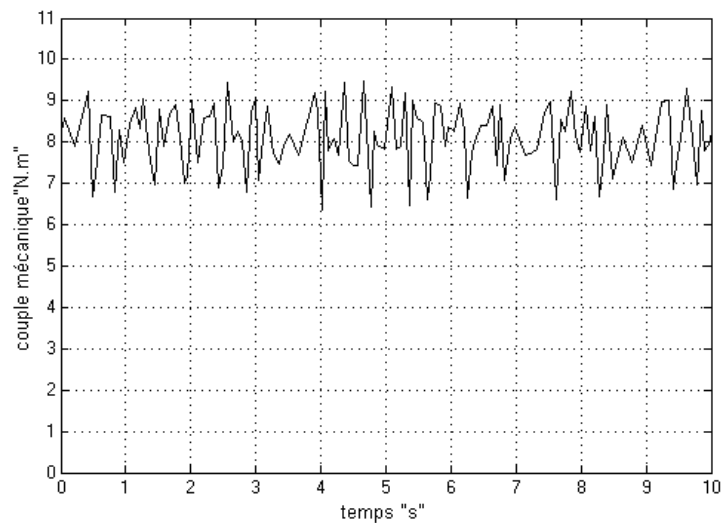


Figure 2.17 : couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec V_v variable ».

La figure (2.17) montre l'évolution du couple mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ($C_{eol}=8N.m$) ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur le couple mécanique de la turbine ce qui génère des vibrations indésirables au fonctionnement du système

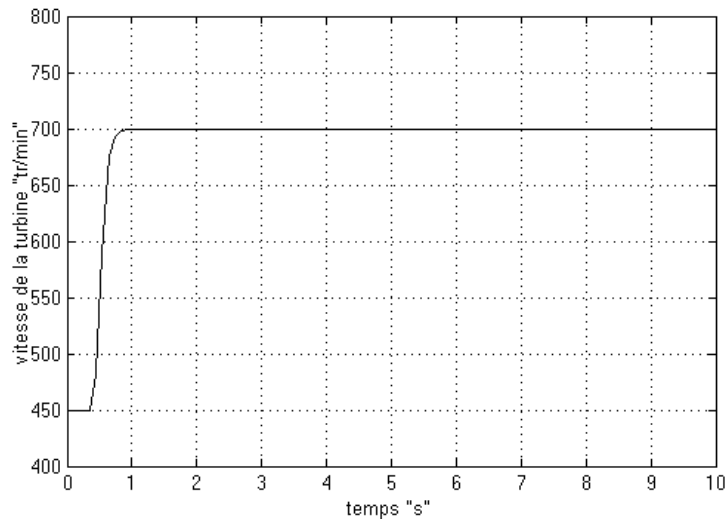


Figure 2.18 : vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec V_v constant ».

La figure (2.18) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps pour un vent de vitesse constante ($V_v=9m/s$), l'allure de la courbe prend une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine qui dure ($t_d=0.8s$) puis il se stabilise à la valeur ($\Omega=700tr/min$).

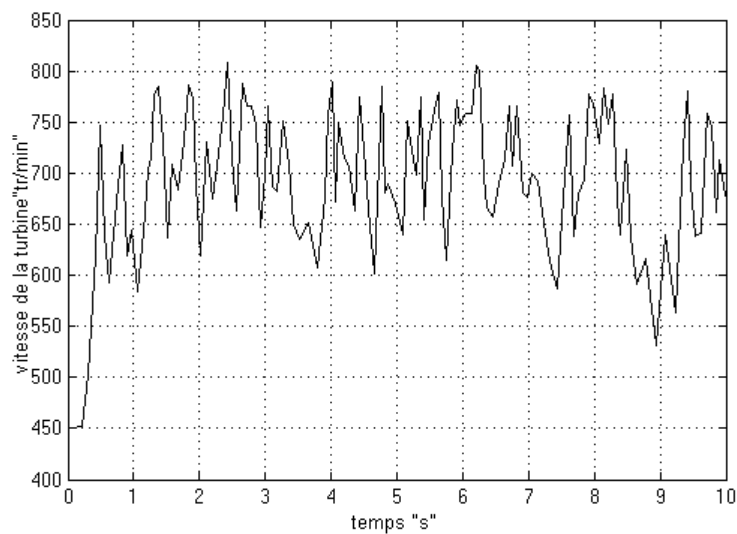


Figure 2.19 : vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec V_v variable ».

La figure (2.19) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable ; l'allure de la courbe prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ($\Omega=700tr/min$) ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur la vitesse de rotation de la turbine ce qui altère la fréquence de la tension et du courant produite par la génératrice.

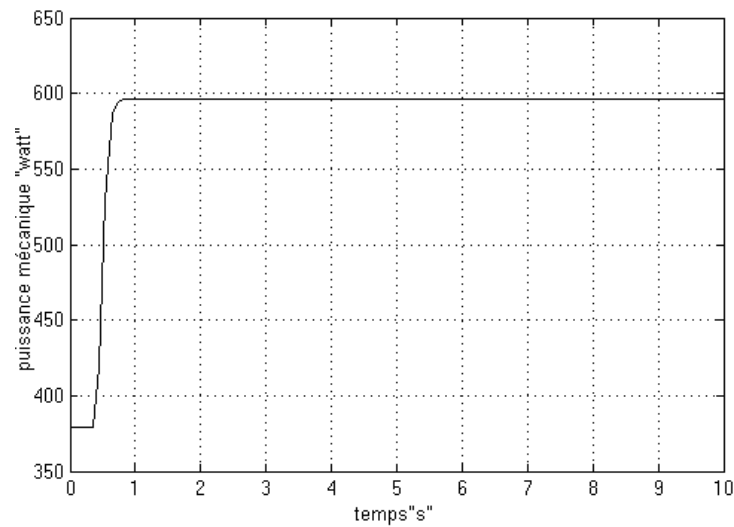


Figure 2.20: puissance mécanique de la turbine (*watt*) « avec V_v constant ».

La figure (2.20) montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps pour un vent de vitesse constante ($V_v=9m/s$), l'allure de la courbe prend une forme croissante dans le régime de démarrage de la turbine qui dure ($t_d=0.8s$) puis il se stabilise à la valeur ($P_m \approx 600watt$).

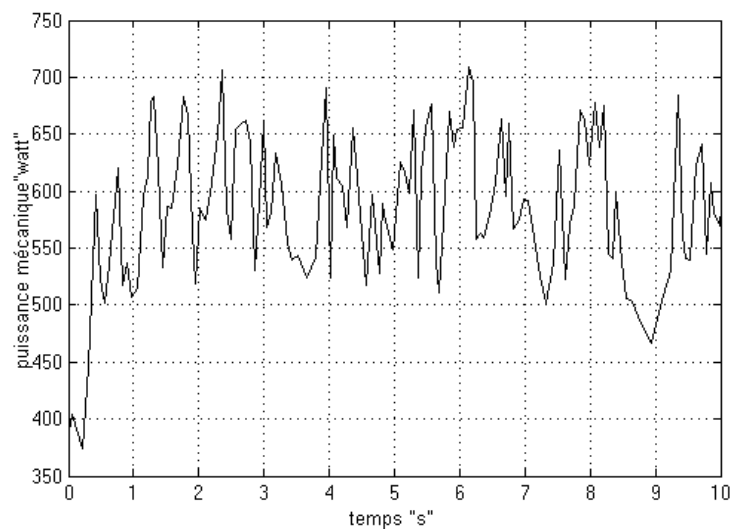


Figure 2.21: puissance mécanique de la turbine (*watt*) « avec V_v variable ».

La figure (2.21) montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ($P_m=600watt$) ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur la puissance mécanique de la turbine ce qui altère la qualité de l'énergie électrique issue plus tard de la génératrice.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, Le gisement éolien Algérien a été brièvement présenté, l'énergie éolienne et prometteuse, un modèle du vent a été proposé pour notre simulation.

La puissance mécanique récupérée par la turbine dépend de la vitesse du vent et du diamètre de la turbine, pour une vitesse du vent de $9m/s$ et un rayon de pale de $1m$ on a pu récupérer une puissance mécanique d'environ $600watt$.

La turbine est par la suite modélisée et simulée pour deux profils de vent différents, les résultats montrent que le profil du vent influe beaucoup sur les paramètres mécaniques et énergétiques de la turbine éolienne.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la chaîne électromécanique qui comporte la génératrice et le convertisseur statique.

Chapitre 3

Modélisation et simulation de la génératrice et du convertisseur statique

3.1 Introduction

La turbine éolienne fournit un couple mécanique qui dépend de la vitesse du vent, Une des pièces maîtresses d'un système de conversion d'énergie dédié à une éolienne est la génératrice, Comme décrit au Chapitre 1, les machines utilisées dans ces systèmes sont de Construction spécifique, bien adaptées aux besoins particuliers de ce domaine. [16]

A chaque type de voilure, correspond une conception de la machine électrique. Elle dépend aussi de l'électronique de puissance en aval.

3.2 Caractérisation de la machine

Dans le cadre de notre étude, nous disposons d'une machine spécialement conçue pour être employée dans un ensemble éolien à axe horizontal. Il s'agit d'une machine synchrone multi pôle à aimants permanents. Compte tenu de la gamme de vitesse de rotation de l'éolienne, le nombre élevé de pôles sert à obtenir une fréquence électrique Suffisante sans avoir recours au multiplicateur mécanique.

3.3 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents :

Cette machine comporte comme toutes les autres machines triphasées un stator bobiné. Mais, dans ce cas là (MSAP) le rotor est remplacé par des aimants, et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotoriques ainsi que la présence d'une source d'alimentation afin de fournir le courant d'excitation. [18]

La figure (3.1) représente le schéma de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

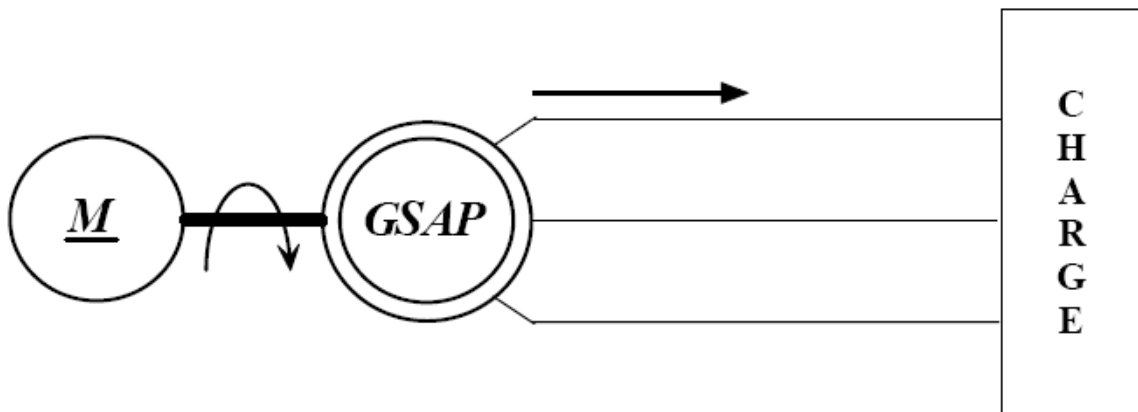


Figure 3.1 : Schéma représentatif de la GSAP [18].

3.3.1 Modèle mathématique de la GSAP dans le référentiel généralisé

Le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents nécessite l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices, car cela permet une étude et une exploitation plus aisées. Ces simplifications proviennent des propriétés des machines à courants alternatifs [19].

- La saturation du circuit magnétique est négligée ;
- La distribution sinusoïdale des f.m.m créés par les enroulements statorique ;
- L'effet d'encoche est négligé ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température ;
- L'hystérésis, l'effet de peau et les courants de Foucault sont aussi négligés.

3.3.2 Modèle biphasé de la GSAP dans le référentiel généralisé

La modélisation de cette machine nécessite aussi comme toute autres machines triphasées de passer du système d'axes triphasés (réel) au système d'axes biphasés (et réciproquement). Pour cela il faut utiliser les transformations de Park suivantes :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Où :

x_a, x_b, x_c : les valeurs instantanées des grandeurs triphasées ;

x_d, x_q : les valeurs instantanées des grandeurs biphasées ;

x_0 : la composante homopolaire ;

$[P(\theta)]$: la matrice directe de Park ;

$[P(\theta)]^{-1}$: la matrice inverse de Park.

Les matrices de Park modifiées (matrices orthogonales) sont données ensuite :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Avec θ est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé.

La figure (3.2) représente schématiquement les enroulements de la GSAP selon le repère de Park généralisé (d,q).

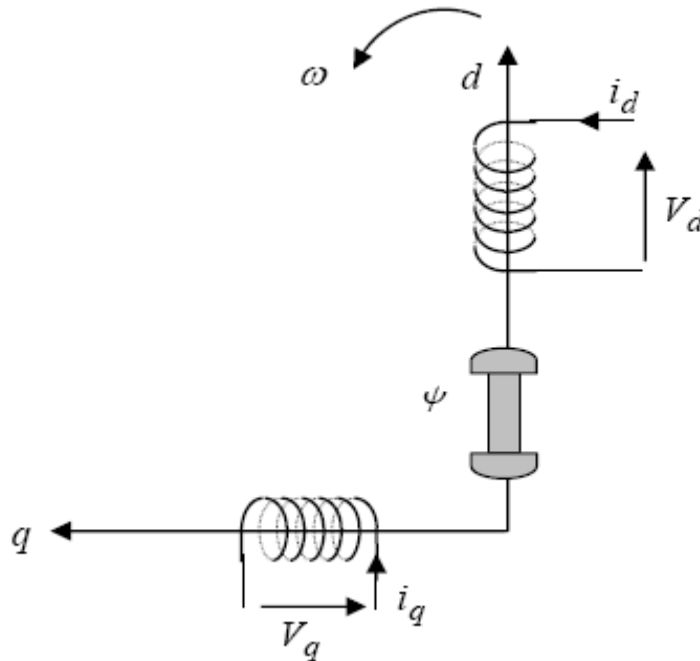


Figure 3.2 : Représentation schématique des enroulements de la GSAP selon (d, q) [18].

Les systèmes d'équations différentielles de la GSAP suivant le référentiel de Park généralisé sont [20] :

1. Equations électriques :

$$\begin{aligned} V_d &= -R_s i_d - \frac{d}{dt} \psi_d + \omega \psi_q \\ V_q &= -R_s i_q - \frac{d}{dt} \psi_q + \omega \psi_d \end{aligned} \quad (3.5)$$

2. Equations des flux magnétiques :

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.3.3 Modélisation biphasé en charge de la GSAP

Dans notre cas d'étude nous allons modéliser la génératrice en charge, pour cela on suppose que la génératrice alimente une charge électrique (R_{ch} , L_{ch}),

Pour avoir les tensions et courants résultant de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les tensions données par

$$\begin{aligned} V_d &= -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega L_q i_q \\ V_q &= -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{aligned} \quad (3.7)$$

D'autre part, l'application des tensions V_d et V_q sur la charge donne :

$$\begin{aligned} V_d &= R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{d}{dt} i_d - \omega L_{ch} i_q \\ V_q &= R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{d}{dt} i_q + \omega L_{ch} i_d \end{aligned} \quad (3.8)$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (3.8), on aura le système suivant :

$$\begin{aligned} 0 &= -(R_s + R_{ch}) i_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_d + \omega (L_q + L_{ch}) i_q \\ 0 &= -(R_s + R_{ch}) i_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_q - \omega (L_d + L_{ch}) i_d + \omega \psi_f \end{aligned} \quad (3.9)$$

En introduisant la transformation de Laplace dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{aligned} P i_d &= \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[-(R_s + R_{ch}) i_d + \omega (L_q + L_{ch}) i_q \right] \\ P i_q &= \frac{1}{L_q + L_{ch}} \left[-(R_s + R_{ch}) i_q - \omega (L_d + L_{ch}) i_d + \omega \psi_f \right] \end{aligned} \quad (3.10)$$

Où P : Opérateur de la place

3.3.4 Expressions du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique

Pour compléter le modèle électromécanique de la GSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique.

L'expression du couple électromagnétique est exprimée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \left[(L_q - L_d) i_d i_q + i_q \psi_f \right] \quad (3.11)$$

L'équation mécanique est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} - f \Omega = C_m - C_{em} \quad (3.12)$$

3.3.5 Bloc de simulation de la GSAP

Pour la simulation, il suffit à présent d'implanter le modèle de la GSAP sous l'environnement Matlab/Simulink.

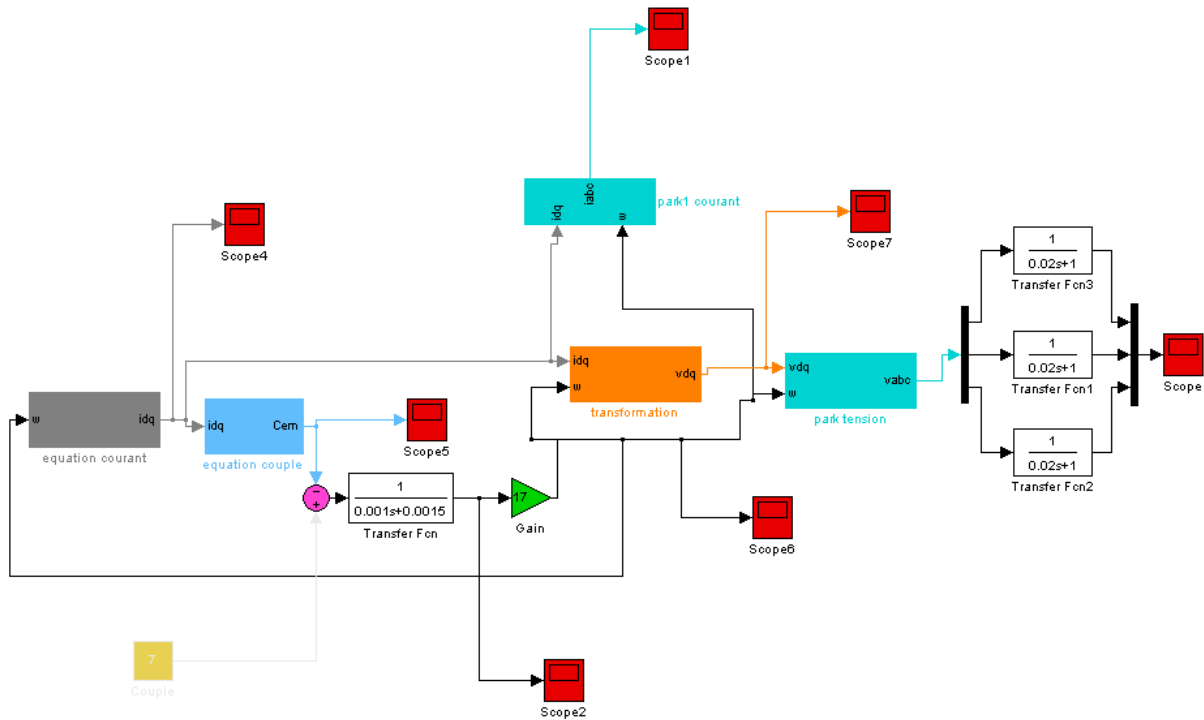


Figure 3.3 : bloc de simulation de la génératrice synchrone à aimant permanent.

3.3.6 Paramètre de simulation

Résistance des enroulement statorique : $R_s = 0.895 \Omega$

Résistance de la charge : $R_{ch} = 50 \Omega$

L'inductance sur l'axe d : $L_d = 0.012 H$

L'inductance sur l'axe q : $L_q = 0.0211 H$

Inductance de la charge : $L_{ch} = 0.02 H$

Flux des aimants : $\Psi_f = 0.9 Wb$

Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.0015 N.m.s/rad$

Moment d'inertie de la génératrice : $J = 0.001 Kg.m^2$

Couple mécanique fourni par la turbine : $C = 7 N.m$

Nombre de pôles : $P = 17$

Temps de la simulation : $t_s = 0.05s$

3.3.7 Résultats de la simulation en charge

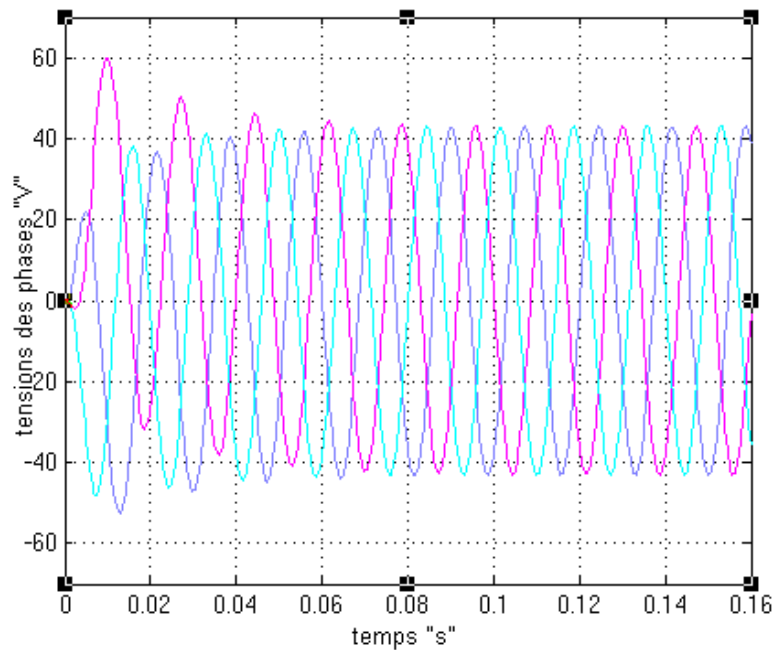


Figure 3.4 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), « $ts=0.16s$ ».

La figure (3.4) représente l'évolution des tensions réelles de la GSAP, en fonction du temps pour un couple ($C=7N.m$) et une vitesse de la turbine de ($\Omega=700tr/min$) constante, les tensions entrent dans un régime uniforme et stable à la valeur ($v_a=v_b=v_c=40V$) après un régime transitoire perturbé de démarrage qui dure $0.05s$, comme c'est éclairci sur la figure(3.5).

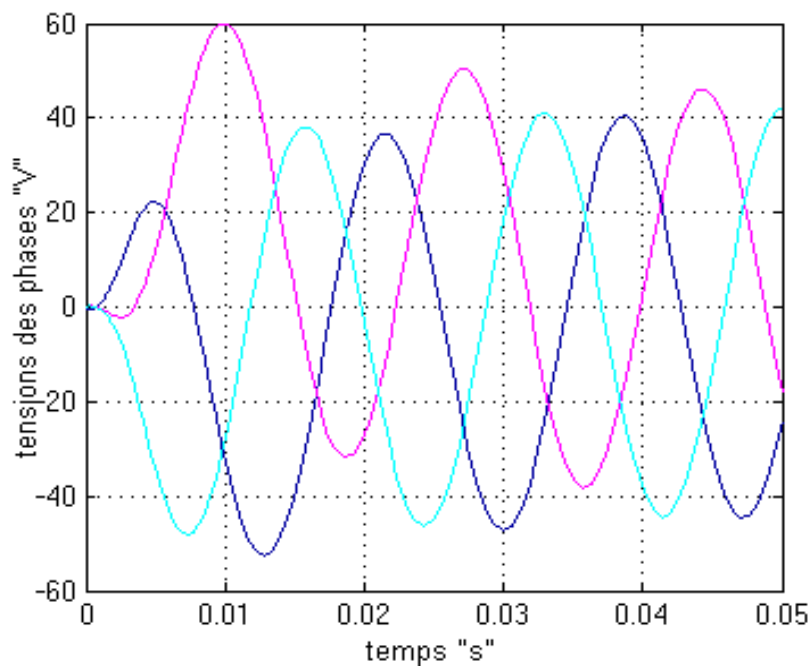


Figure 3.5 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), « $ts=0.05s$ ». **Zoom**

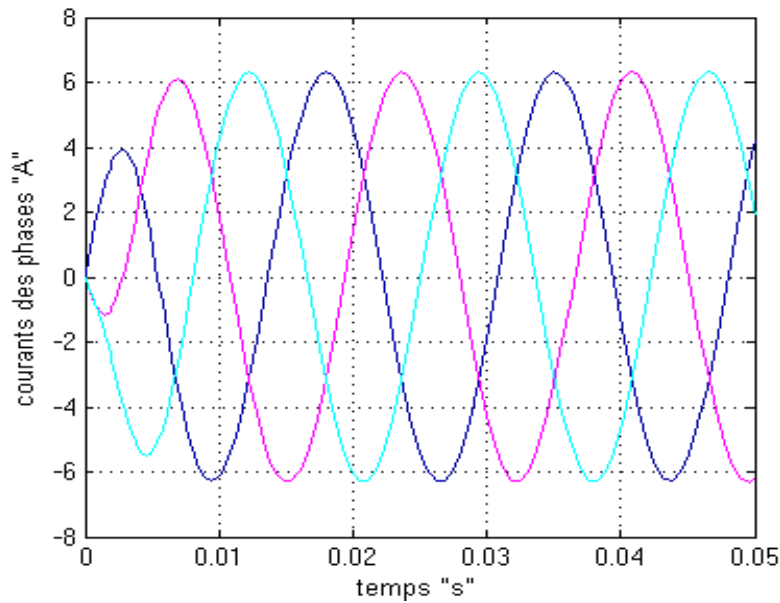


Figure 3.6: Evolution des courants des phases i_a, i_b, i_c (A). « $t_s=0.05s$ ».

La figure (3.6) représente l'évolution des courants réelles de la GSAP, en fonction du temps pour un couple ($C=7N.m$) et une vitesse de la turbine de ($\Omega=700tr/min$) constante, les courants entrent dans un régime uniforme et stable à la valeur ($v_a=v_b=v_c=6A$) après un régime transitoire perturbé de démarrage qui dure $0.01s$.

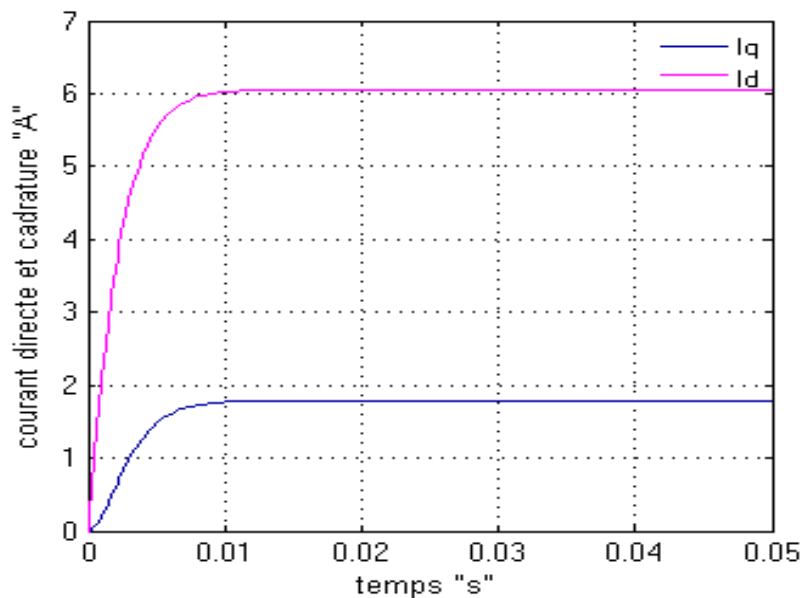


Figure 3.7 : Evolution des courants direct et quadrature $i_d ; i_q$ (A).

La figure (3.7) représente l'évolution courants selon les deux axes direct et en quadrature en fonction du temps et pour les même valeur du couple et de la vitesse précité, les courants entrent dans un régime uni forme et stable à la valeur ($i_d=6A$ et $i_q=1.8A$) après un régime transitoire perturbé de démarrage qui dure $0.01s$.

3.4 Convertisseur statique

La génératrice synchrone fournit une tension alternative à fréquence variable, pour assurer une tension alternative à fréquence fixe l'insertion d'un convertisseur statique est obligatoire, dans notre cas d'étude on a utilisé un pont de diode pour avoir une tension continue suivie d'un filtre RL. Un onduleur triphasé à GTO commandé par MLI est raccordé au redresseur.

3.4.1 Pont de diodes

Les convertisseurs statiques utilisés couramment dans les chaînes de conversion d'énergie dédiées aux systèmes éoliens (chapitre 1), sont basés sur des modules entièrement commandés qui leur rendent coûteux donc pénalisant dans un ensemble de petite puissance. Dans le souci de réduction des coûts, le pont de diodes, peu onéreux, semble attractif à condition que les performances énergétiques ne soient pas trop dégradées.

3.4.1.1 Modèle du redresseur à diodes

Nous allons commencer par modéliser un redresseur monophasé à diode sur charge R, L

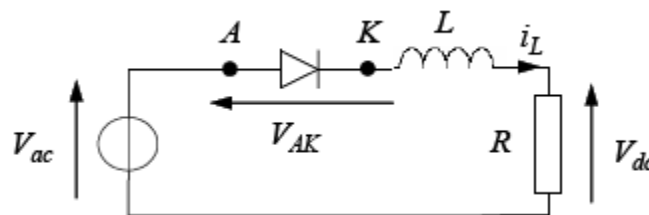


Figure 3.8: Redresseur monophasé à diode [17]

3.4.1.2 Rappel sur les règles de conduction d'une diode

Une diode se met à conduire lorsque la tension anode-cathode devient positive ($V_{AK} > 0$). Lorsqu'elle est conductrice, la tension à ses bornes est nulle (cas d'une diode parfaite) ou plus généralement égale à une valeur de seuil U_{d0} (typiquement comprise entre 0.5 et 1 V). Cette valeur reste toutefois négligeable devant les autres chutes de tension dans le circuit. Le courant dans la diode est alors imposé par le reste du circuit.

Une diode se bloque lorsque le courant anode-cathode qui la traverse s'annule ($i_{AK} = 0$). La tension anode-cathode est alors imposée par le reste du circuit.

3.4.1.3 Modèle du redresseur monophasé à diode

Le comportement du redresseur peut être caractérisé en exprimant le courant dans l'inductance :

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_L dt \quad (3.13)$$

Où la tension V_L aux bornes de l'inductance dépend de l'état de conduction c de la diode. En effet, lorsque la diode est conductrice ($c = 1$), on a :

$$V_L = 0 \quad (3.14)$$

Ainsi, de façon générale, en fonction de l'état de conduction c de la diode, la tension aux bornes de l'inductance s'exprime par :

$$V_L = c(V_{ac} - V_{dc}) \quad (3.15)$$

En exprimant la tension aux bornes de la charge résistive en fonction du courant dans l'inductance,

$$V_{dc} = R i_L \quad (3.16)$$

L'équation (3.13) devient :

$$i_L = \frac{1}{L} \int c(V_{ac} - R i_L) dt \quad (3.17)$$

Reste à établir l'état de conduction c de la diode. A partir des règles élémentaires évoquées précédemment en début de paragraphe, nous pouvons dire que la diode est conductrice ($c = 1$) si et seulement si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

$$V_{ac} - V_{dc} > 0 \quad \text{ou} \quad i_L > 0 \quad (3.18)$$

Le premier terme traduit la condition d'amorçage de la diode. En effet, lorsque la diode est bloquée, nous avons $V_{AK} = V_{ac} - V_{dc}$. Le deuxième terme indique la continuité de la conduction tant que le courant dans la diode $i_L = i_{AK}$ reste strictement positif. Si l'une des deux conditions précédente n'est pas remplie, la diode est bloquée ($c = 0$).

En exploitant les relations précédentes, nous déduisons le modèle du redresseur monophasé présenté Figure (3.9).

On remarque que le fait de traduire à la fois la tension aux bornes de l'inductance et la condition de conduction en fonction de la tension $V_{ac} - V_{dc}$ permet de simplifier le modèle Simulink par l'utilisation d'un seul multiplexeur qui calcule simultanément c et V_L .

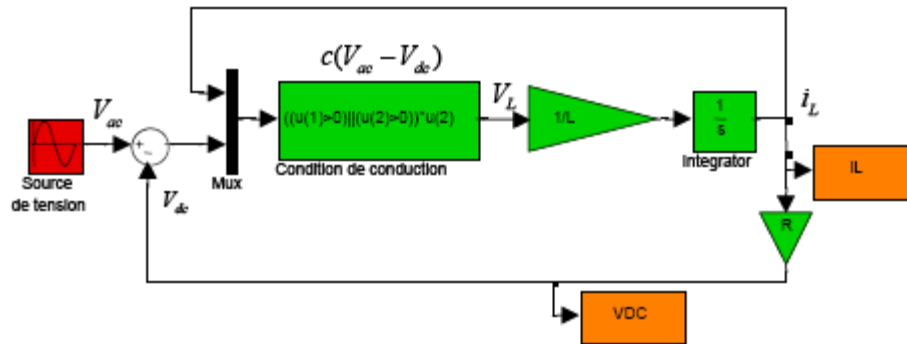


Figure 3.9: Bloc de simulation d'un redresseur monophasé débitant sur une charge inductive. [17]

3.4.1.4 Modélisation et simulation d'un pont de diode sans prise en compte de l'empiétement

On considère un redresseur alimenté par une source de tension, et débitant sur une batterie supposée idéale. Dans un premier temps, on considère que l'impédance de la source est nulle.

Dans ce cas, les courants de ligne i_a , i_b et i_c prennent à tour de rôle la valeur (et forme) du courant continu I_{dc} . Chaque diode assure la conduction du courant pendant $1/3$ de la période. Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle, le courant s'établit instantanément à sa valeur I_{dc} lorsqu'une diode devient conductrice.

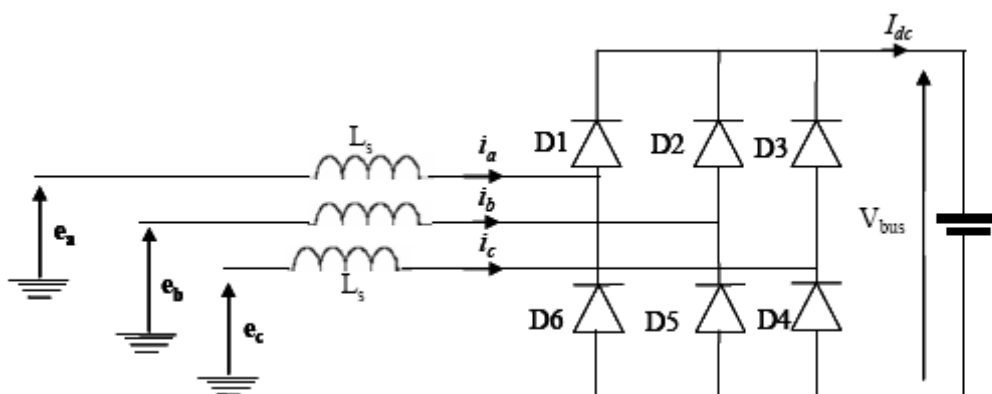


Figure 3.10 Schéma d'un pont de diodes [17]

Le schéma équivalent pendant une séquence de conduction (par exemple phases 1 et 2) est représenté sur Figure 3.11.

A partir du schéma équivalent, et en appliquant la loi des mailles et des noeuds, nous pouvons écrire :

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2L_s} [V_a - V_b - V_{bus}] \quad (3.19)$$

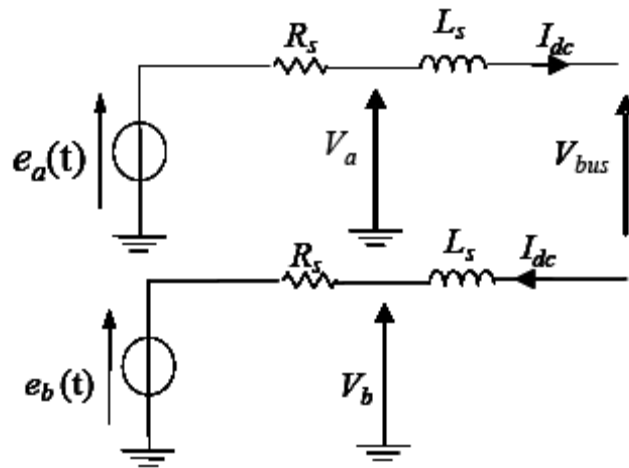


Figure 3.11: Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale [17]

Pour implanter ce modèle sous Matlab /Simulink, la diode a été simulée comme dans le cas du redresseur monophasé. Il reste maintenant à sélectionner les phases qui vont rentrer en conduction. Ceci est fait à l'aide d'une fonction Matlab *max/min* qui nous permet de sélectionner respectivement la tension la plus positive et la plus négative des trois tensions disponibles en amont du pont de diodes. Le courant continu en aval du pont de diodes est calculé à partir de l'équation (3.19).

Les courants de ligne en amont du redresseur à diodes sont déterminés à partir du courant continu en aval de celui-ci, qu'on a multiplié par les séquences de conduction de chaque phase.

3.4.1.5 Bloc de simulation du pont de diode

Ce modèle permet une simulation temporelle du comportement complet du redresseur à diode sous Matlab /Simulink.

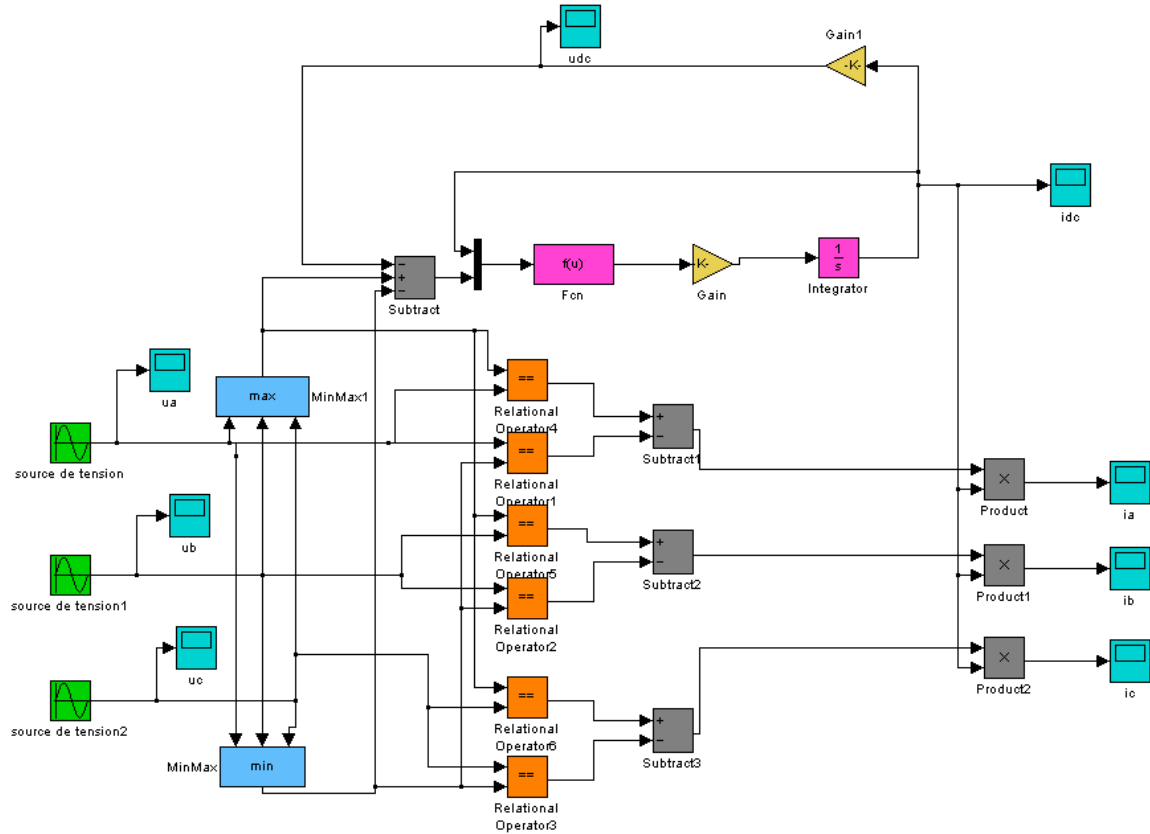


Figure 3.12 : Modèle de simulation d'un pont de diodes en conduction normale sous Matlab/Simulink

3.4.1.6 Paramètre de simulation du redresseur

Tension des phase (a, b, c) respectivement : $V_a = V_b = V_c = 40V$

L'inductance statorique de la génératrice $L_s = 0.02H$

Charge résistive $R = 10\Omega$

Temps de simulation $t_s = 0.02s$

3.4.1.7 Résultats de simulation

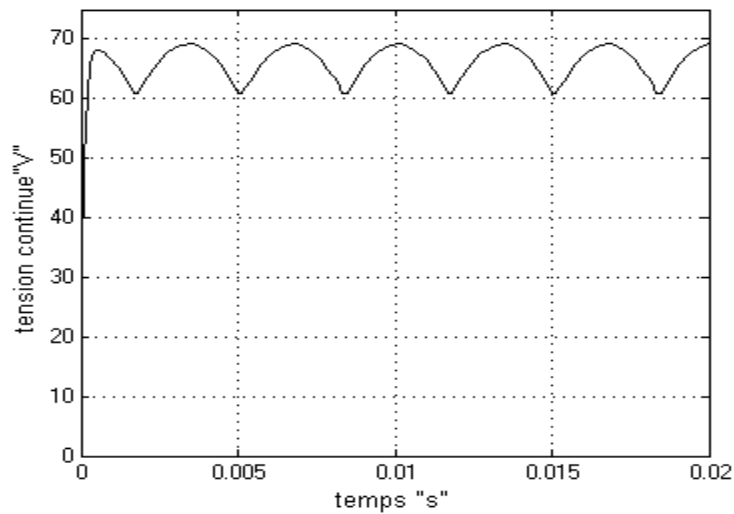


Figure 3.13 : Evolution de la tension continue à la sortie du pont de diode (V)

La figure (3.13) représente l'évolution de la tension continue issue du pont de diode en fonction du temps pour un couple ($C=7N.m$) et une vitesse de la turbine de ($\Omega=700tr/min$) constante, on peut conclure que l'allure de la tension est presque stable, elle oscille autour d'une valeur de ($V_{dc}=65V$), un lissage de la tension est nécessaire, mais l'effet de l'empiétement n'est presque présent.

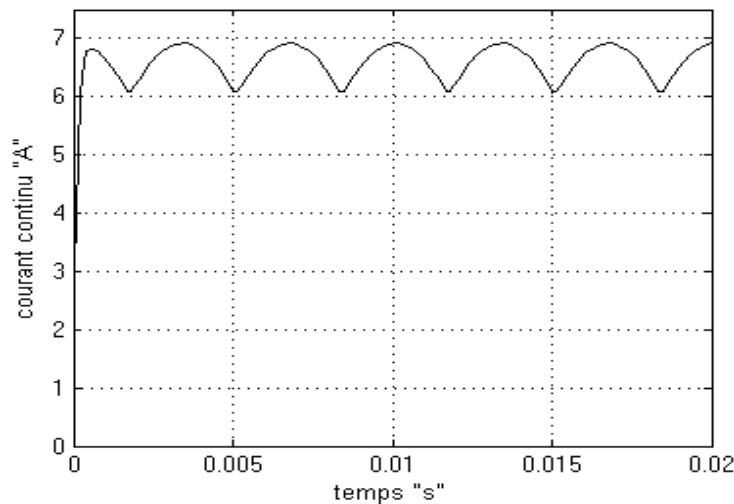


Figure 3.14 : Evolution du courant continu à la sortie du pont de diode (A)

La figure (3.14) représente l'évolution du courant continu redressé par le pont de diode en fonction du temps pour les conditions de couple et vitesse précitées, on peut conclure que l'allure du courant est presque stable, il oscille autour d'une valeur de ($I_{dc}=6.5A$), un filtre pour le lissage du courant est nécessaire.

3.4.2 Onduleur de tension

Les onduleurs de tension alimentent les machines à courant alternatif (charge) à partir d'une source de tension continue. Ils permettent d'imposer aux bornes de la machine (charge) des tensions d'amplitude et de fréquence réglable par la commande. Un onduleur de tension à trois bras comprenant chacun deux cellules de commutation. Chaque cellule est composée d'un interrupteur, commandé à l'amorçage et au blocage et d'une diode antiparallèle.

3.4.2.1 Modélisation des onduleurs de tension

Pour faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation on modélise l'onduleur par un ensemble d'interrupteurs idéaux : c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande.

Pour modéliser l'onduleur de tension Figure (3.15), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être de deux générateurs de F.E.M égale à $U_0/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 .

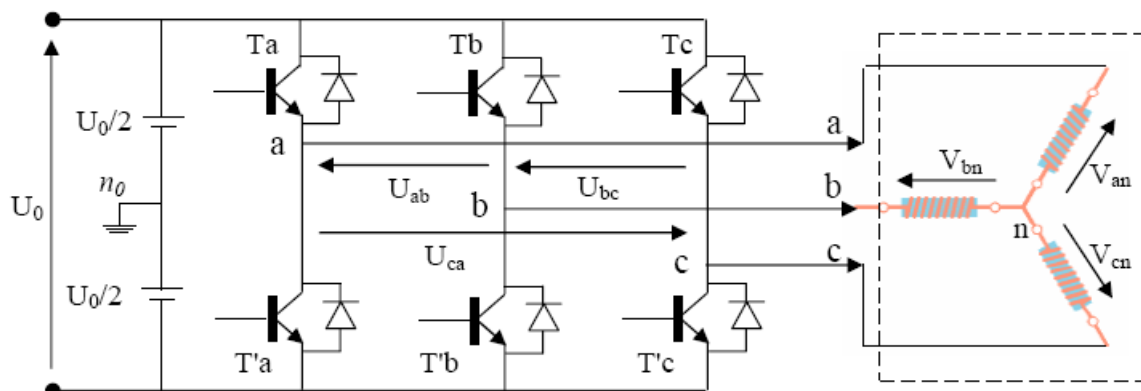


Figure 3.15: Schéma de l'onduleur triphasé [21]

La charge a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an}, V_{bn} et V_{cn} .

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T_i' les transistors (supposée des interrupteurs idéaux), on a :

Si $S_i = 1$, Alors T_i est passant et T_i' est ouvert

Si $S_i = 0$, Alors T_i est ouvert et T_i' est passant

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (3.20)$$

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

$$\begin{cases} V_{an} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (3.21)$$

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

$$\begin{cases} V_{an} + V_{m0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{m0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{m0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (3.22)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{m0} = (1/3)[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (3.23)$$

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

$$V_{in0} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (3.24)$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad (3.25)$$

En remplaçant (3.25) dans (3.23), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad (3.26)$$

En remplaçant (3.25) dans (3.26), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

3.4.2.2 Contrôle du courant par M.L.I

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) à partir d'une source de tension continue, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale.

La M.L.I. est obtenue par la comparaison de deux signaux :

Un signal triangulaire de haute fréquence (F_p) appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence $F_m \ll F_p$. Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Figure (3.16).

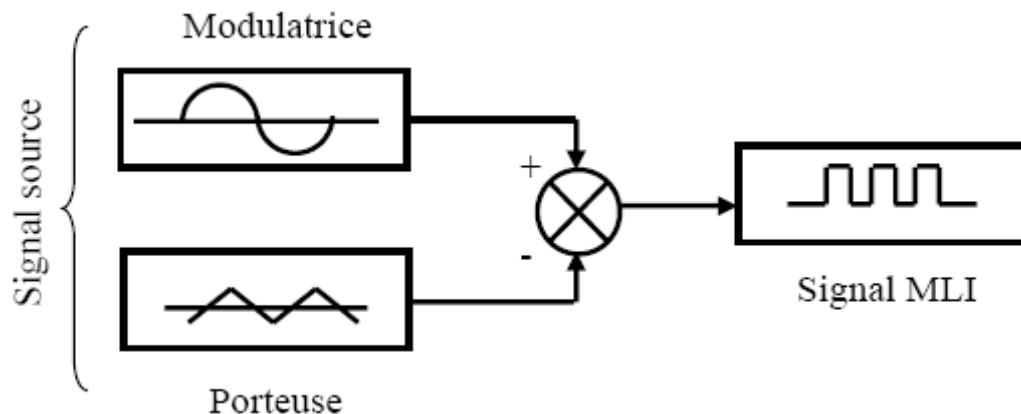


Figure3.16 : Schéma synoptique d'un MLI [22]

Ces deux signaux sont définis comme étant :

- **L'onde porteuse** : qui est signal à haute fréquence (en général, une onde triangulaire).
- **L'onde modulatrice** : qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (En général une onde sinusoïdale).

Deux principaux paramètres caractérisant la MLI, sont.

- **L'indice de modulation M_L** : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulatrice à celle de l'onde porteuse :

$$M_L = \frac{V_m}{V_p} \quad (3.27)$$

- **Le rapport de modulation M_r** : qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice :

$$M_r = \frac{F_p}{F_m} \quad (3.28)$$

3.4.2.3 MLI à échantillonnage naturel :

L'échantillonnage naturel, est un processus de sélection naturelle des points échantillonnés, c'est la technique la plus utilisée et la plus simple, consiste à comparer le signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdale (Modulatrice). L'intersection de ces deux signaux définit les instants de commutation des interrupteurs.

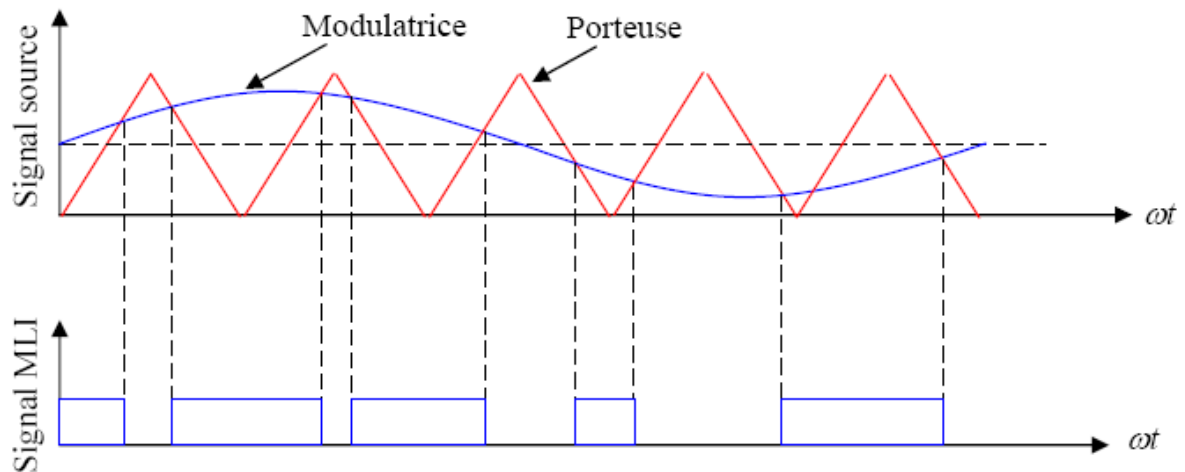


Figure3.17 : M.L.I à échantillonnage naturel [22]

3.4.2.4 Bloc de simulation de l'onduleur de tension

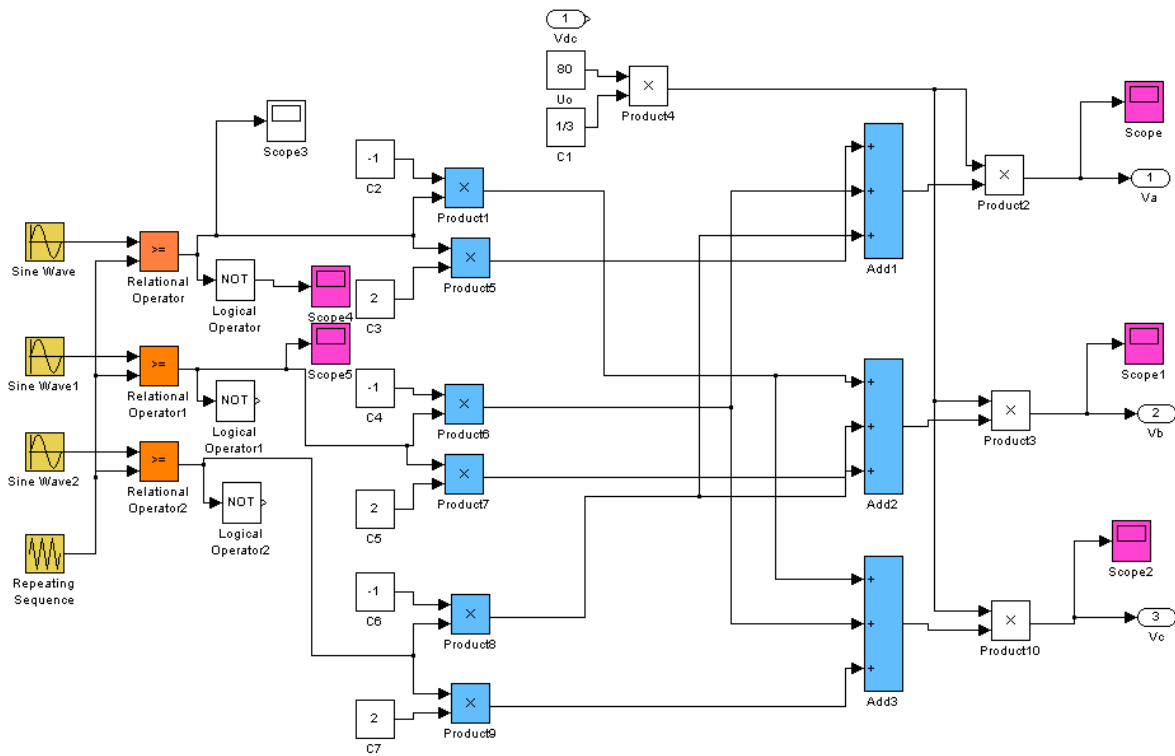


Figure 3.18 : bloc de simulation de l'onduleur de tension

3.4.2.5 Paramètres de simulation

Tension du bus continu $V_{dc}=65V$

Temps de simulation $t_s = 0.04s$

3.4.2.6 Résultats de simulation

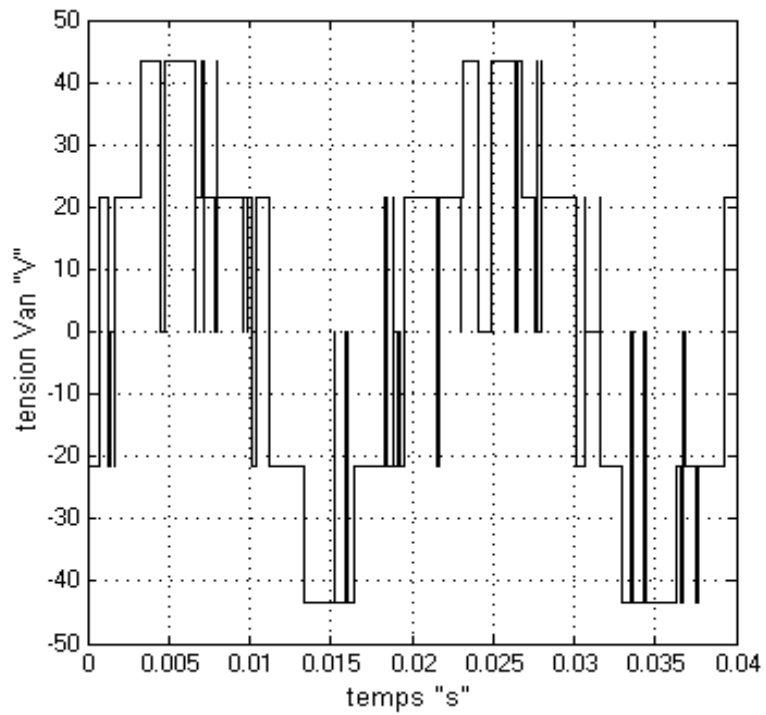


Figure3.19 : Tension a la sortie de l'onduleur V_{an} (V)

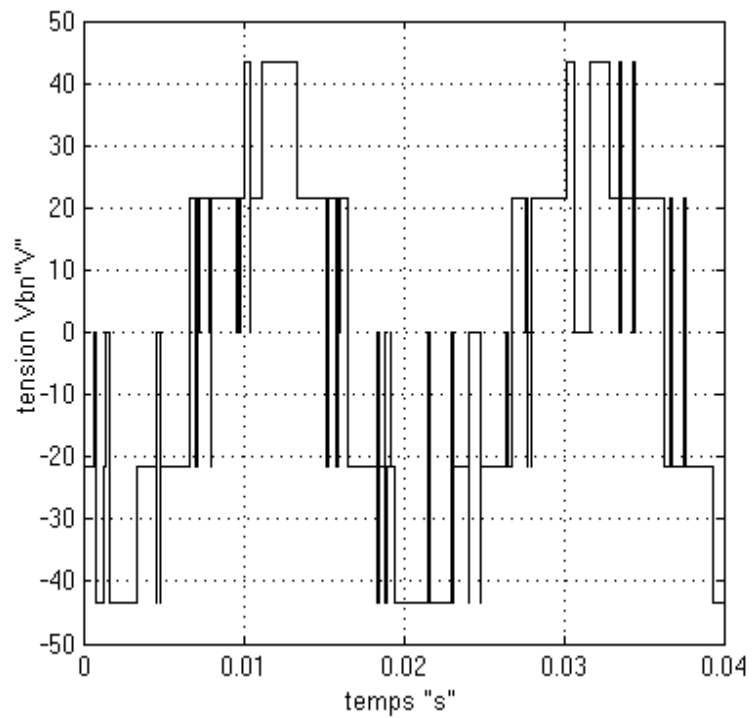


Figure3.20 : Tension a la sortie de l'onduleur V_{bn} (V)

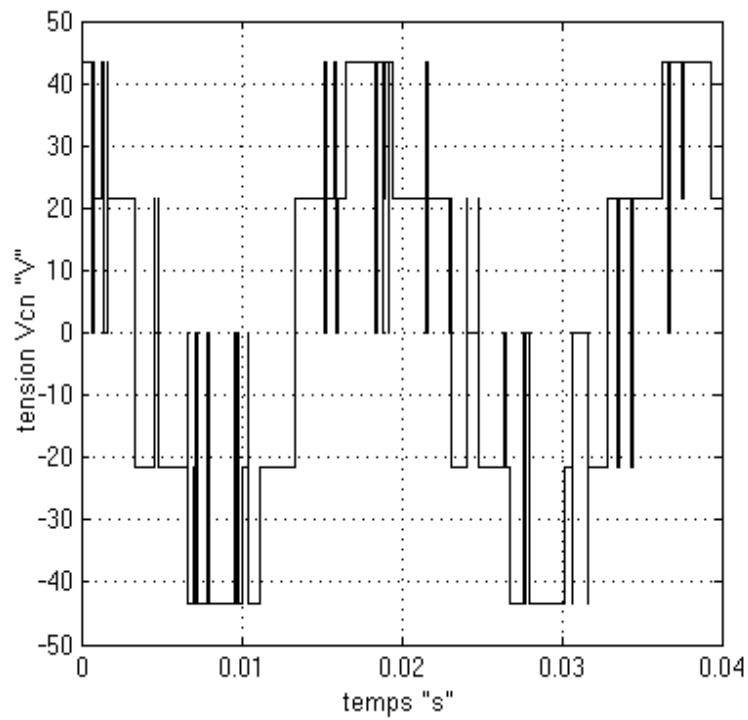


Figure3.21 : Tension a la sortie de l'ondeur $V_{c_n}(V)$

Les figures (3.19), (3.20) et (3.21) montrent respectivement la tension MLI des phases (a,b,c) à la sortie de l'ondeur de tension en fonction du temps il est claire que le signale est périodique et d'une amplitude maximale de $V_{a_n} = V_{b_n} = V_{c_n} = 44V$

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la génératrice synchrone à aimants permanents (MSAP), ainsi sa modélisation sous forme d'équations mathématiques.

Par la suite, et en se basant sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices, le modèle de GSAP dans le repère de Park a été établi dans le but de linéariser le système et faciliter l'étude.

Puis, on a abordé la modélisation du convertisseur statique composé du pont de diode et de l'onduleur de tension. Le principe de fonctionnement du pont de diode et de l'onduleur a été présenté.

La commande de l'onduleur de tension triphasée a été présentée en donnant le principe de l' MLI sinusoïdale.

Les résultats obtenus sur les différentes simulation des différents éléments constituant la chaîne de conversion éolienne montrent que le régime transitoire est d'une durée très courte pour certain comme l'onduleur et le redresseur par contre pour la génératrice et la turbine le temps de repense et beaucoup plus important.

Dans le chapitre suivant nous allons considérer le système dans sa globalité.

Chapitre 4

Modélisation et simulation du système complet

4.1 Introduction

Après avoir présenté les différents éléments constituant notre chaîne de conversion d'énergie éolienne, et après avoir modélisé et simulé chaque élément seul, nous nous attachons dans ce chapitre, à présenter les constituants de la chaîne éolienne de faible puissance dédiée à l'alimentation d'une pompe centrifuge dans un site isolé (par exemple).

Le modèle présenté a pour finalité la simulation comportementale du système complet sur le plan mécanique électrique et énergétique. Les simulations à caractère « système » sont présentées dans ce chapitre

4.2 Difficulté de modélisation du système complet

Le système éolien étudié est un système complexe composé de plusieurs sous systèmes appartenant à plusieurs domaines physiques très différents (Figure 4.1).

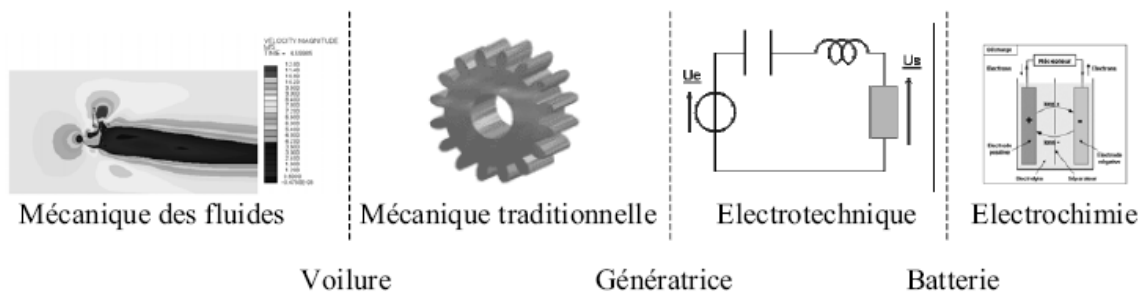


Figure 4.1 : Représentation de caractère multi physique [16]

L'énergie en provenance du vent traverse la voileure qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La voileure est directement accouplée à la génératrice et permet la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. Les composants électriques tels que convertisseurs statiques et éléments de filtrage disposés en aval de la génératrice ont un rôle d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique entre la génératrice et la charge finale. Ce niveau est aussi chargé du pilotage de l'ensemble et d'obtenir le point de fonctionnement à la puissance optimale.

L'énergie électrique récupérée par la turbine peut être stockée ou utilisée directement (comme dans notre cas) où elle alimente un moteur asynchrone qui entraîne une pompe centrifuge dans un site isolé, ou même assurer l'éclairage dans les maisons en site isolé comme le montre la figure (4.2).

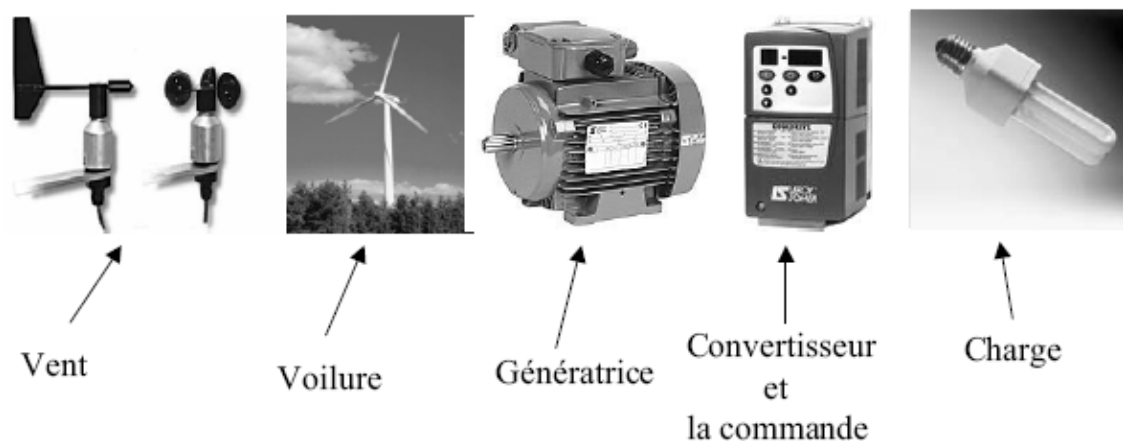


Figure 4.2 chaîne de conversion éolienne [16]

4.3 Modélisation de la chaîne éolienne

Notre chaîne éolienne passive de petite puissance abordée au chapitre 1, est constituée d'une voileure couplée directement à une génératrice synchrone qui débite sur un bus continu via un redresseur à diodes débitant sur un onduleur de tension.

4. 3.1 Bloc de simulation du système complet

Les cinq parties constituant la chaîne de conversion éolienne ont été associées et on a abouti à un modèle complet pour notre chaîne de conversion de petite puissance.

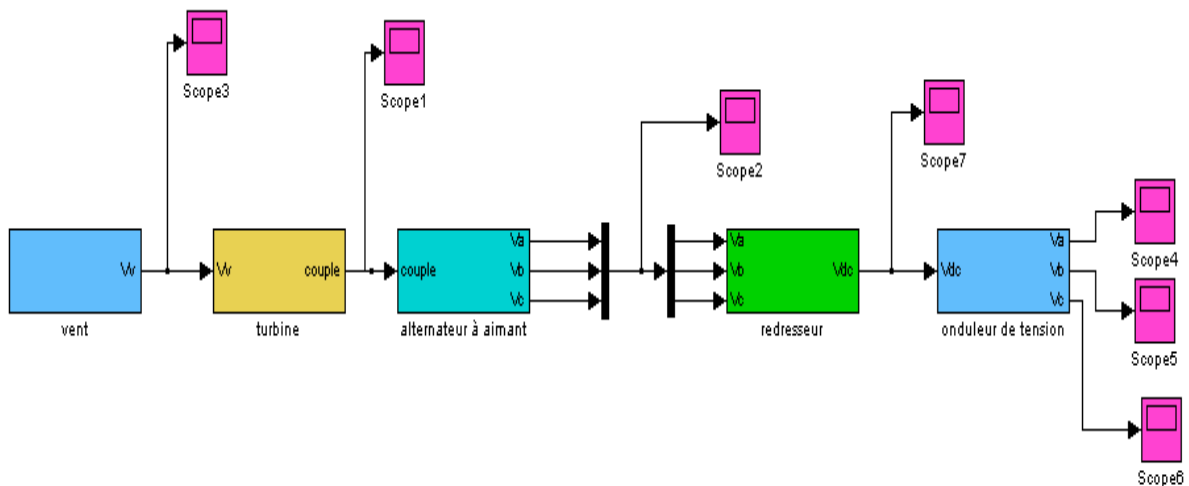


Figure 4.3 : Synoptique du modèle instantané implémenté sous Matlab /Simulink

4. 3.2 Paramètres de simulation

Les paramètres de simulation ont été déjà annoncés aux chapitres précédents.

4. 3.3 Résultats de la simulation du système complet

Le but de la simulation est de connaître l'influence de la nature du vent sur les paramètres mécaniques, énergétiques et électriques de la chaîne.

On considère trois cas :

- Vitesse du vent fixe.
- Vitesse du vent variable (la variation est de 10% de sa valeur moyenne ($9 \pm 1 \text{ m/s}$)) (voir figure (2.11)),
- Profil d'un vent réel (voir figure (2.3)).

4.3 .3.1 Influence du profil du vent sur les paramètres mécaniques de la chaîne

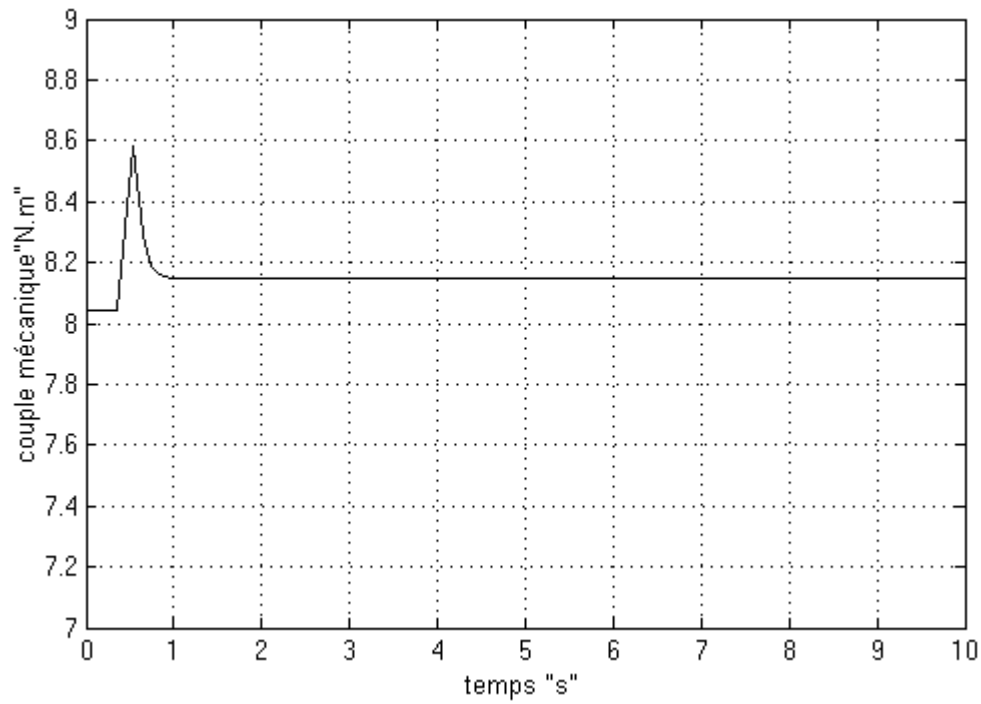


Figure 4.4 : Evolution du couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec V_v constant ».

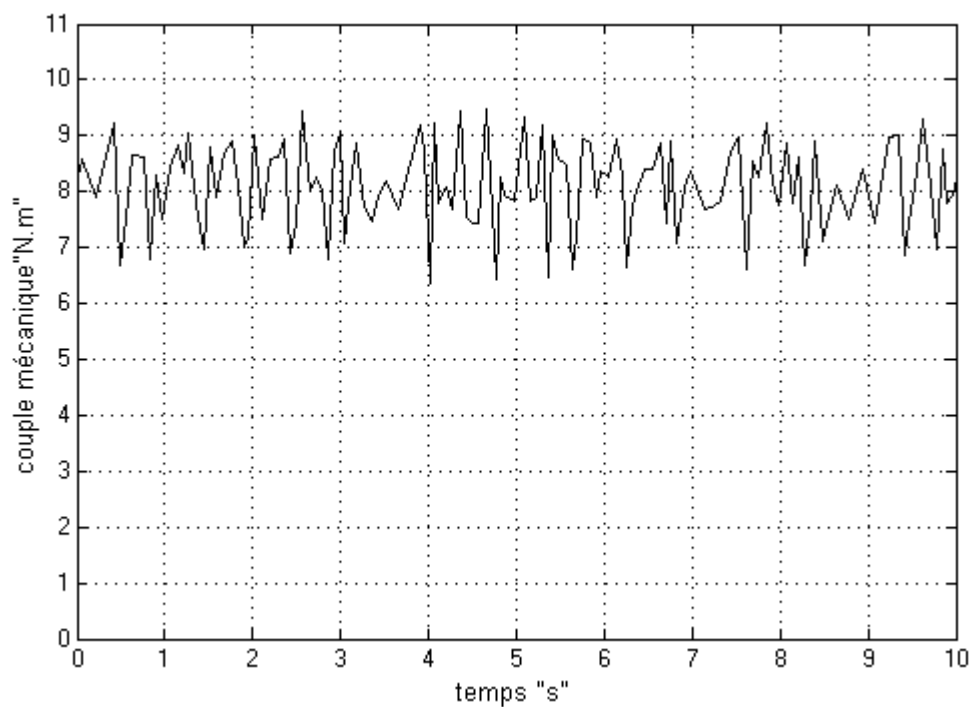


Figure 4.5 : Evolution du couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec V_v variable ».

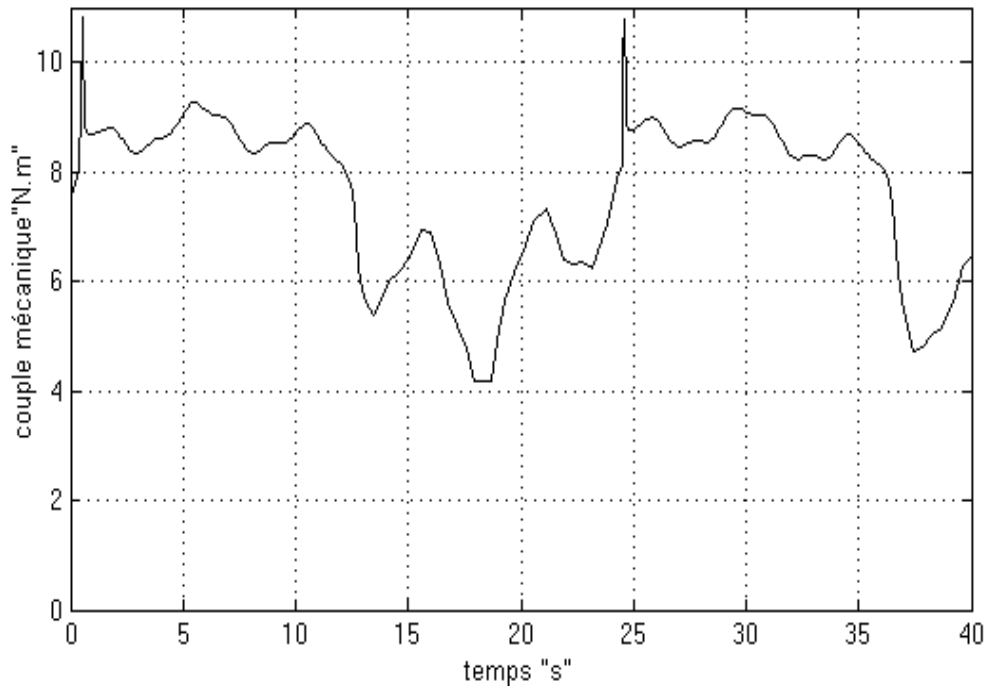


Figure 4.6 : Evolution du couple mécanique de la turbine ($N.m$) « avec profil du vent réel ».

Les figures (4.4), (4.5) et (4.6) montrent l'évolution du couple mécanique de la turbine en fonction du temps.

Il est clair que le profil du vent influence beaucoup sur le couple mécanique de la turbine, pour un vent constant le couple est constant le système fonctionne dans un point optimal toutes les grandeurs qui suivent seront constantes cas de la figure (4.4).

Pour un vent variable ($9 \pm 1 m/s$) le couple varie peu, il est limité entre (9 et $7 N.m$) cette variation n'influence pas beaucoup sur les autres paramètres de la chaîne, la vitesse et la tension ne seront pas trop altérées, cas de la figure (4.5).

Pour un profil du vent (réel) (voir figure 2.3) qui varie entre deux valeurs $6 m/s$ et $12 m/s$ entraîne une variation dans le couple mécanique de la turbine de (10 à $4 N.m$) cet écart dévie complètement la chaîne de son point de fonctionnement et l'entraîne dans un fonctionnement aléatoire, cas de la figure (4.6).

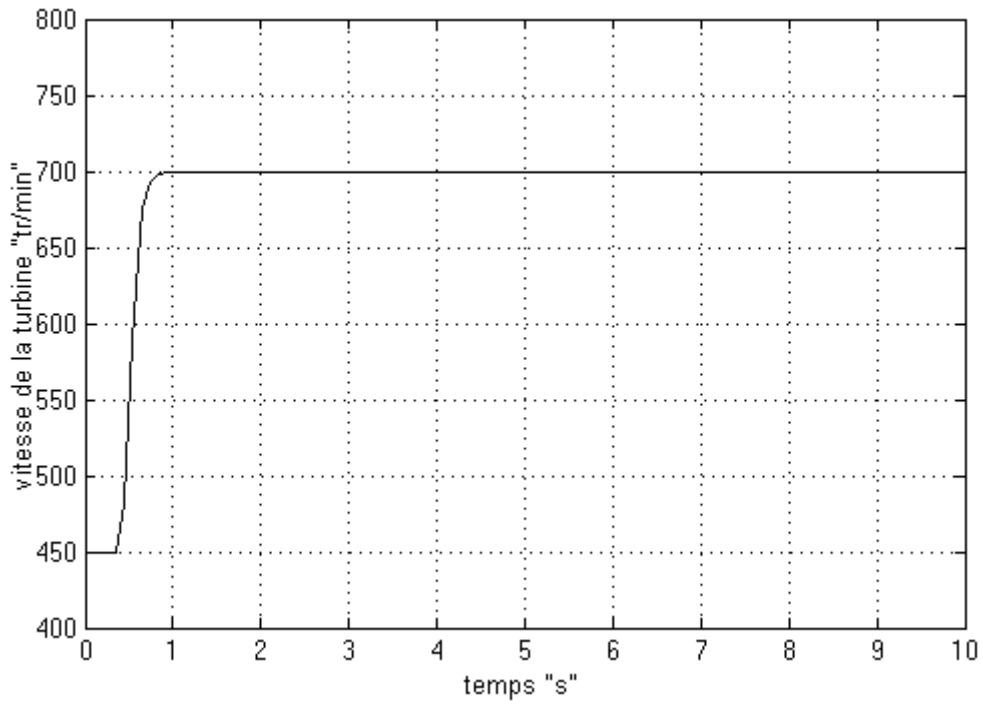


Figure 4.7: Evolution de la vitesse de rotation de la turbine (*tr/min*) « avec V_v constant ».

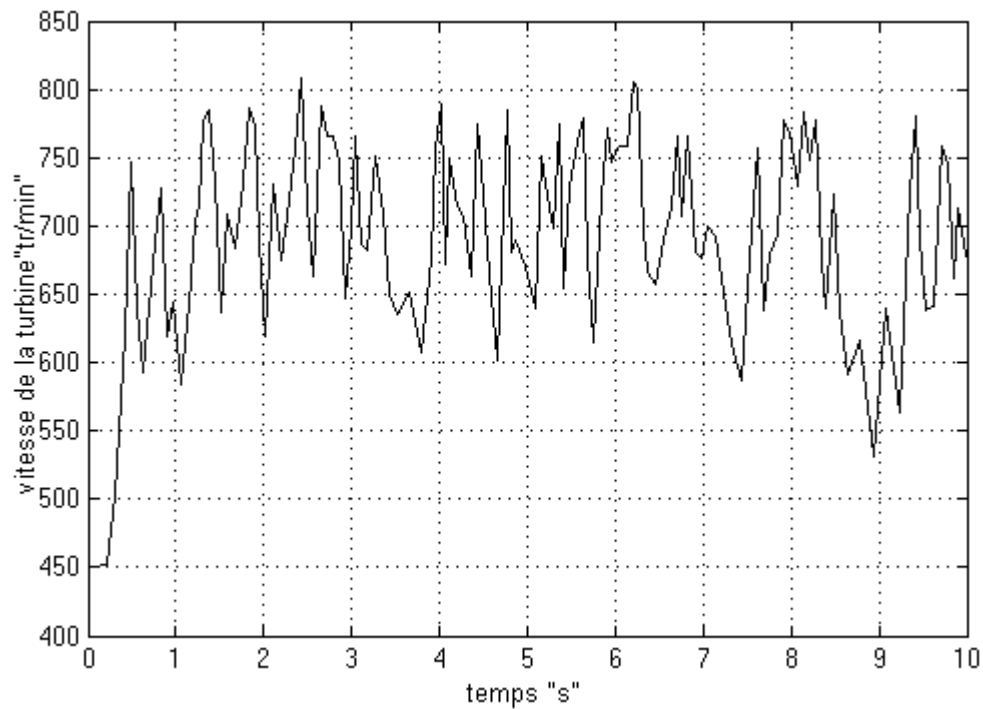


Figure 4.8: Evolution de la vitesse de rotation de la turbine (*tr/min*) « avec V_v variable ».

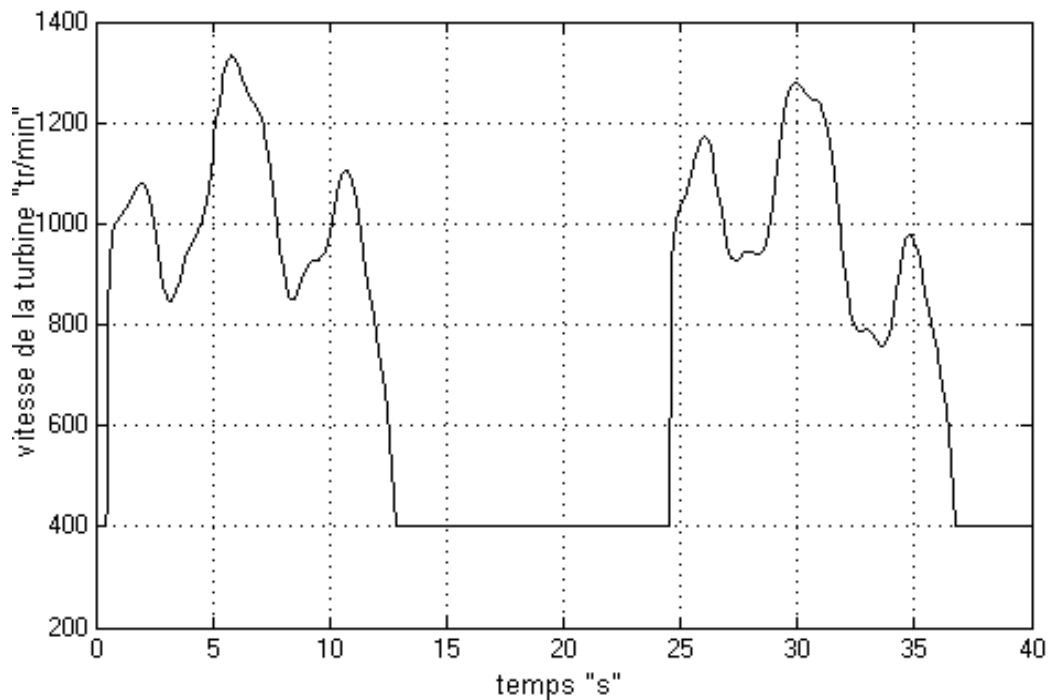


Figure 4.9: Evolution de la vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec profil du vent réel ».

Les figures (4.7), (4.8) et (4.9) représentent l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps.

Il est clair que le profil du vent influe beaucoup sur la vitesse de rotation de la turbine pour un vent constant la vitesse est constante le système fonctionne dans un point optimal toutes les grandeurs qui suivent seront constantes cas de la figure (4.7).

Pour un vent variable ($9 \pm 1 m/s$) la vitesse de rotation de la turbine varie peu, elle est limitée entre (600 et $800 tr/min$) cette variation n'influe pas beaucoup sur les autres paramètres de la chaîne telle que la valeur de la fréquence et de la tension, cas de la figure (4.8).

Pour un profil du vent (réel) (voir figure 2.3) qui varie entre deux valeurs $6 m/s$ et $12 m/s$ entraîne une variation dans la vitesse de rotation de la turbine de (400 à $1300 tr/min$) cet écart dévie complètement la chaîne de son point de fonctionnement et l'entraîne dans un fonctionnement aléatoire plein de risque, cas de la figure (4.9).

4.3.3.2 Influence du profil du vent sur les paramètres énergétiques de la chaîne

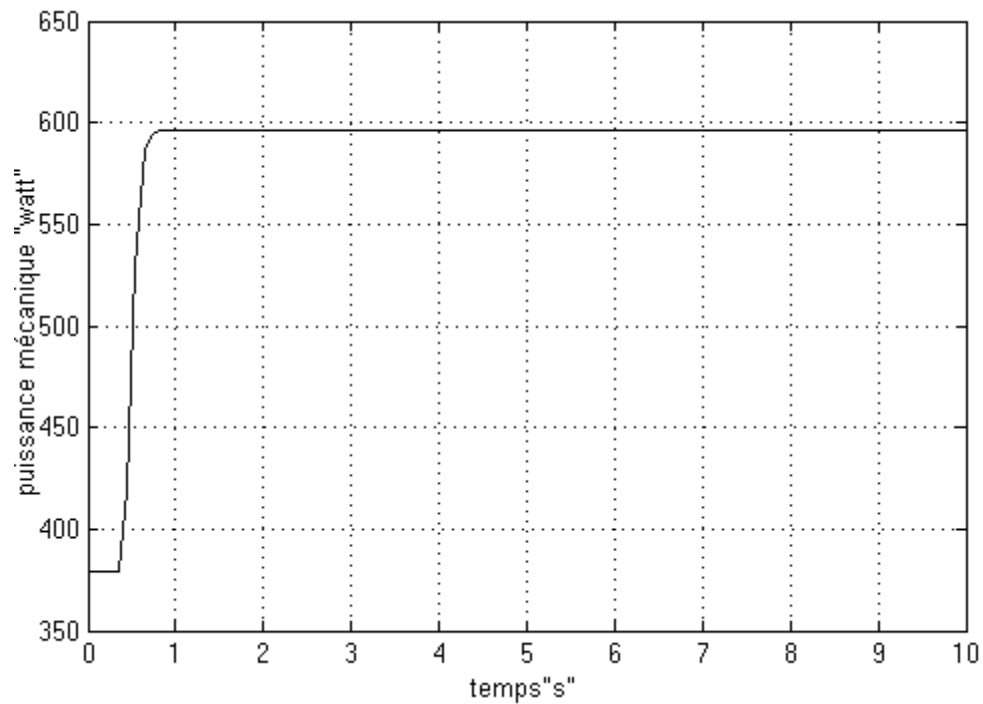


Figure 4.10: Evolution de la puissance mécanique de la turbine (*watt*) « avec V_v constant ».

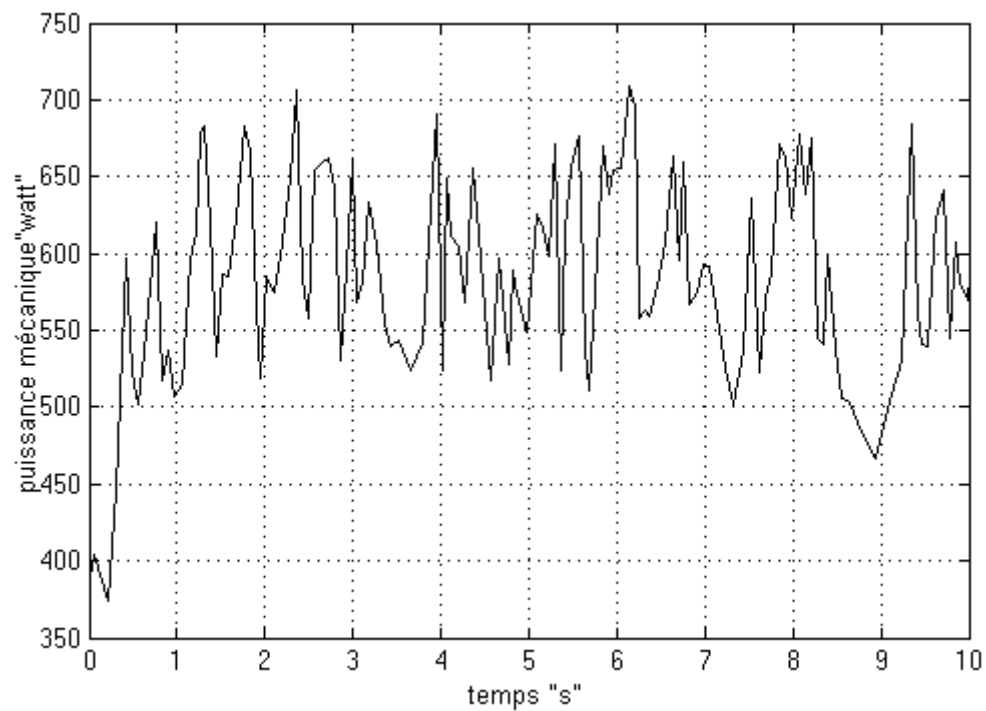


Figure 4.11: Evolution de la puissance mécanique de la turbine (*watt*) « avec V_v variable ».

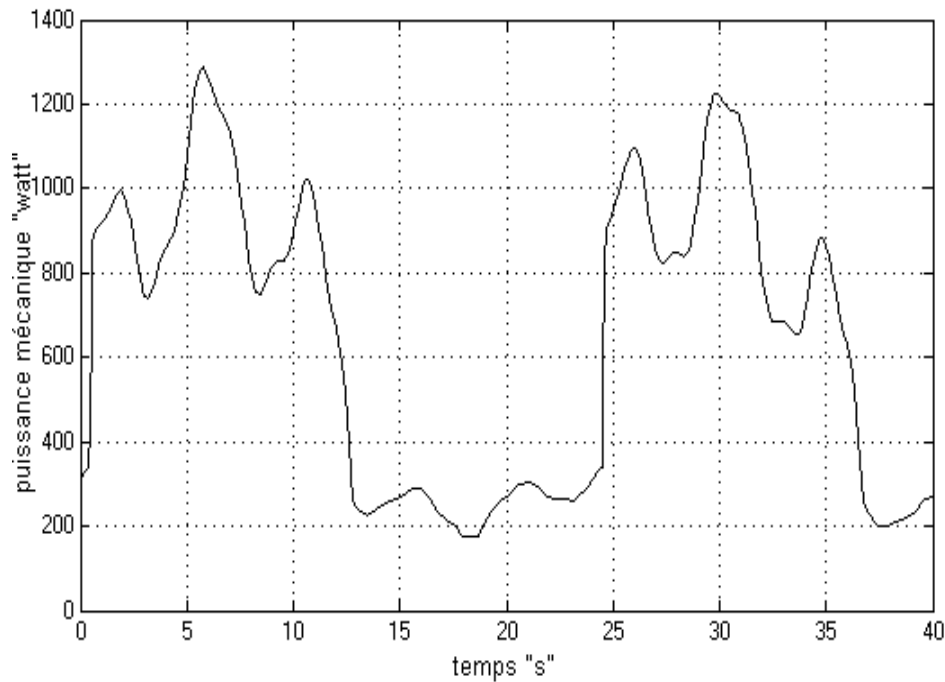


Figure 4.12: Evolution de la puissance mécanique de la turbine (watt) «avec profil du vent réel ».

Les figures (4.10), (4.11) et (4.12) représentent l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps.

Il est clair que le profil du vent influence beaucoup sur la puissance mécanique de la turbine. Pour un vent constant, la puissance mécanique est constante. Le système fonctionne à la puissance nominale. Toutes les grandeurs qui suivent seront constantes, cas de la figure (4.10).

Pour un vent variable ($9 \pm 1 \text{ m/s}$) la vitesse de rotation de la turbine varie peu, elle est limitée entre (500 et 700 Watt). Cette variation n'influence pas beaucoup sur la qualité de l'énergie que donne la chaîne, cas de la figure (4.11).

Pour un profil de vent (réel) (voir figure 2.3) qui varie entre deux valeurs 6 m/s et 12 m/s entraîne une variation dans la puissance mécanique de la turbine de (200 à 1300 Watt) ce qui dégrade la qualité de l'énergie fournie par la chaîne, cas de la figure (4.12).

4.3.3.3 Influence du profil du vent sur les paramètres électriques de la chaîne

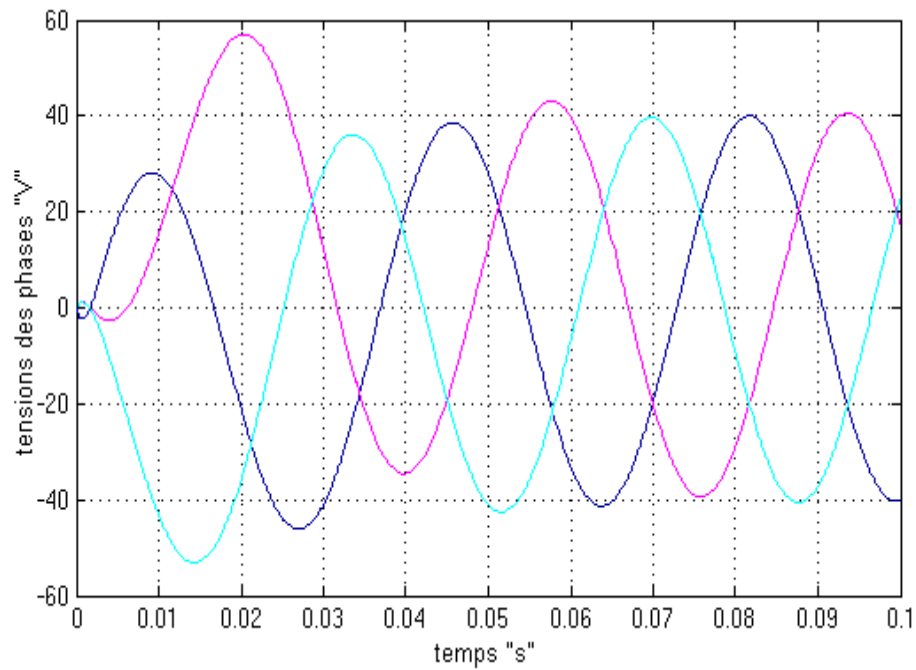


Figure 4.13 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), «avec V_v constante».

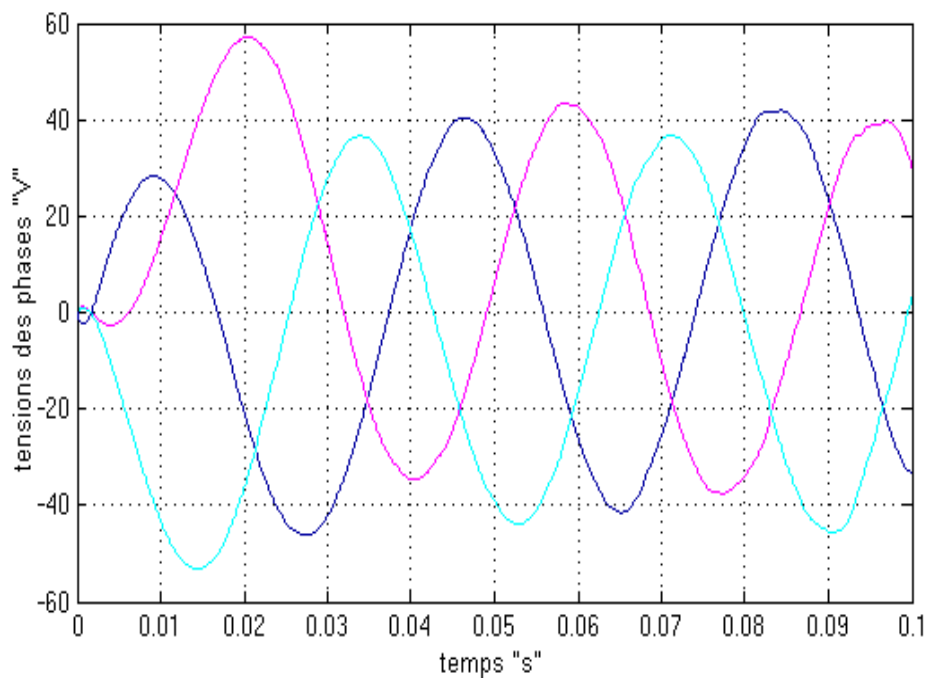


Figure 4.14 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), «avec V_v variable ».

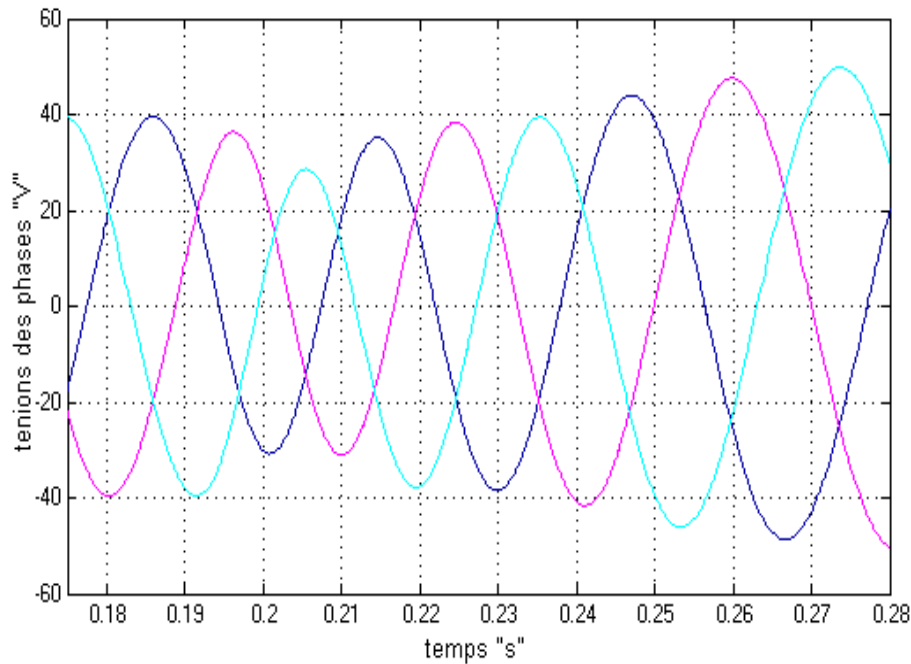


Figure 4.14 : Evolution des tensions des phases v_a, v_b, v_c (V), «avec profil du vent réel ».

Les figures (4.13), (4.14) et (4.15) montrent l'évolution de la valeur des tensions des phases en fonction du temps.

Il est clair que le profil du vent influe beaucoup sur l'amplitude et la fréquence des tensions des phases, pour un vent constant l'amplitude et la fréquence des tensions des phases sont constantes la génératrice délivre alors une tension d'amplitude et de fréquence constante toutes les grandeurs qui suivent seront constantes, cas de la figure (4.13).

Pour un vent variable ($9\pm 1\text{m/s}$) l'amplitude et la fréquence des tensions des phases varie peu, cette variation n'influe pas beaucoup car le convertisseur statique assure par la suite une bonne qualité d'énergie de la chaîne, cas de la figure (4.14).

Pour un profil du vent (réel) (voir figure 2.3) qui varie entre deux valeurs 6m/s et 12m/s entraîne une variation considérable dans l'amplitude ($\pm 10\text{V}$) et la fréquence des tensions des phases ce qui dégrade la qualité de l'énergie fournie par la chaîne, cas de la figure (4.15).

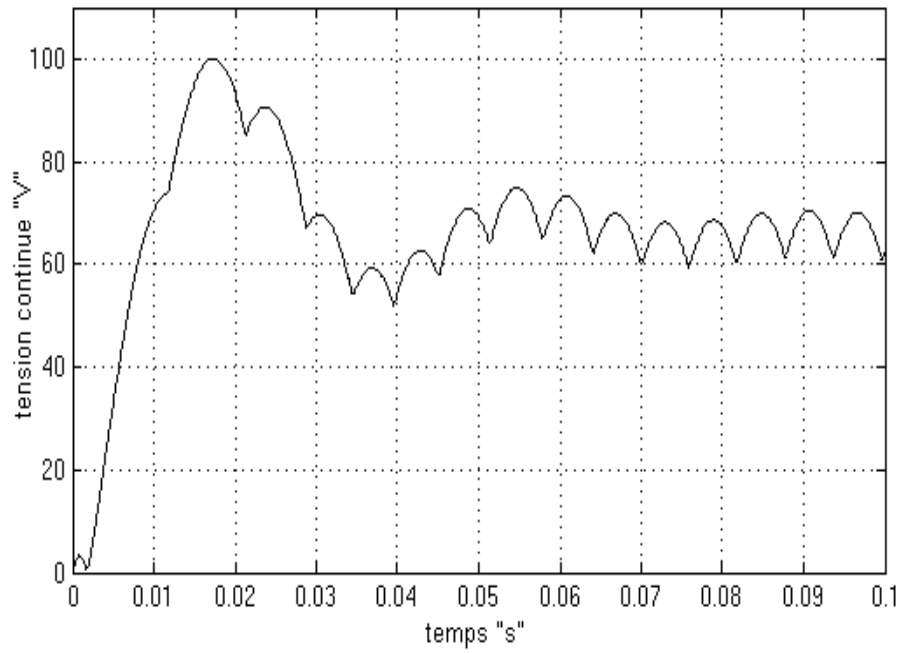


Figure 4.16 : Evolution de la tension continue à la sortie du pont de diode (V) «avec V_v constante ».

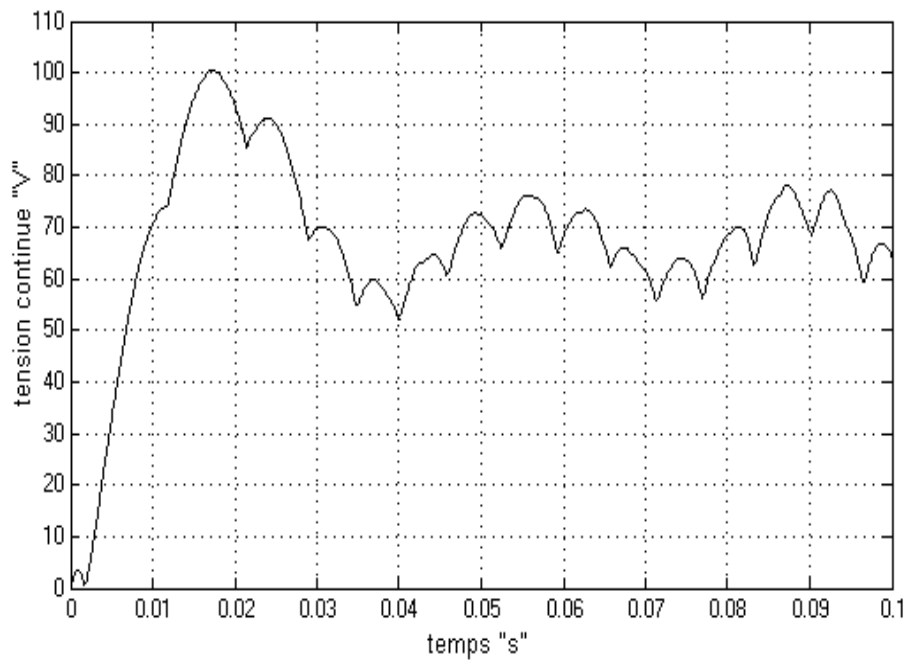


Figure 4.17 : Evolution de la tension continue à la sortie du pont de diode (V) «avec V_v variable ».

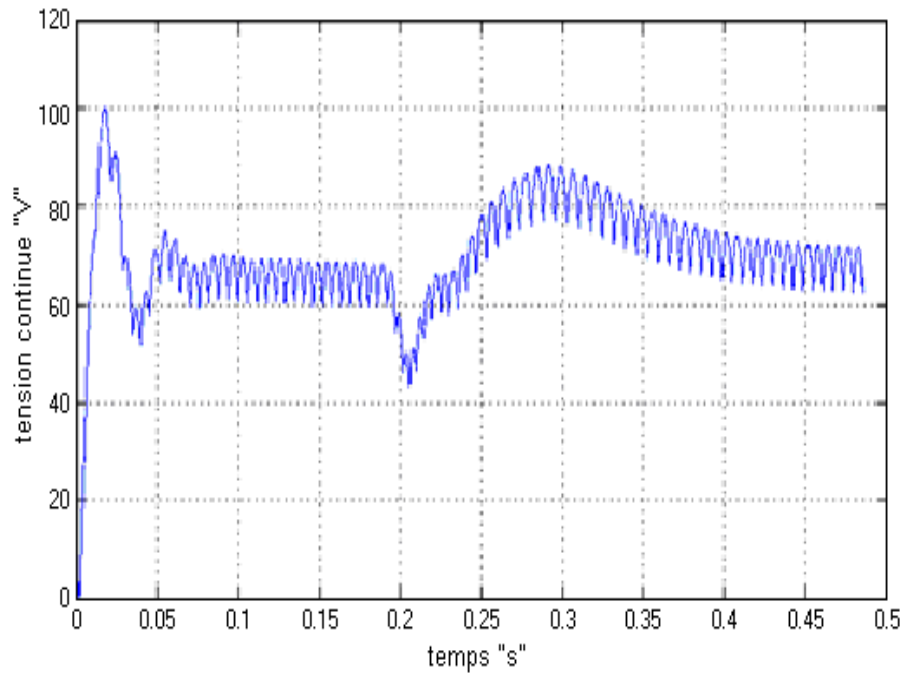


Figure 4.18 : Evolution de la tension continue à la sortie du pont de diode (V)
«Avec profil du vent réel ».

Les figures (4.16), (4.17) et (4.18) montrent l'évolution de la tension continue à la sortie du redresseur en fonction du temps.

Il est clair que le profil de vent influe sur l'amplitude de la tension continue à la sortie du redresseur, pour un vent constant l'amplitude est constante le redresseur délivre alors une tension d'amplitude constante toutes les grandeurs qui suivent seront constantes cas de la figure (4.16).

Pour un vent variable ($9 \pm 1 \text{ m/s}$) l'amplitude de la tension continue à la sortie du redresseur varie peu, cette variation dans une bande de ($\pm 5 \text{ V}$) n'influe pas beaucoup sur la charge que alimente la chaîne, cas de la figure (4.17).

Pour un profil du vent (réel) (voir figure 2.3) qui varie entre deux valeurs 6m/s et 12m/s entraîne une variation considérable ($\pm 20 \text{ V}$) dans l'amplitude de la tension continue à la sortie du redresseur ce qui influe beaucoup sur la charge que alimente la chaîne, cas de la figure (4.18).

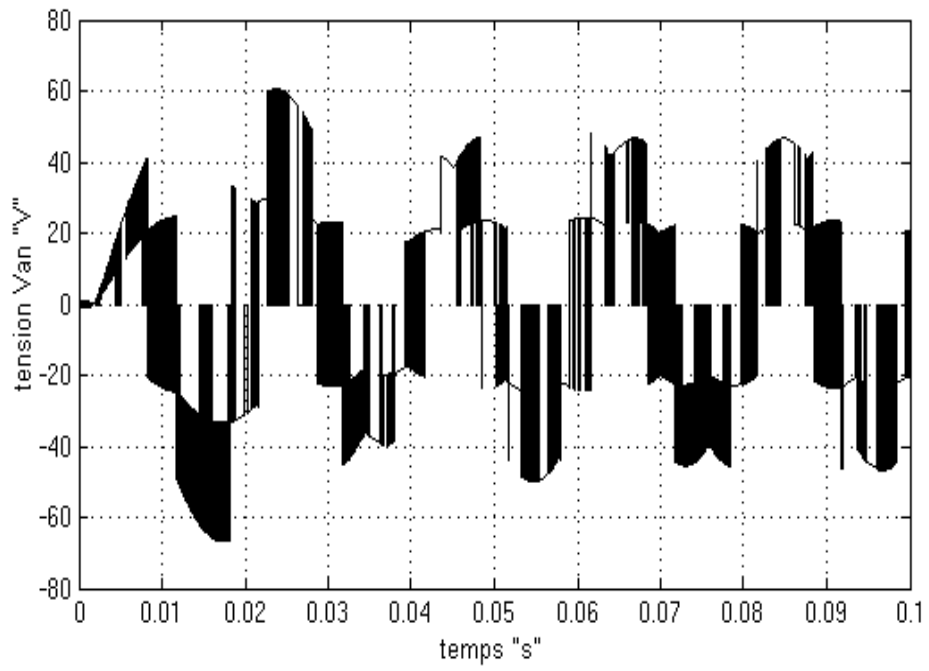


Figure 4.19 : Tension à la sortie de l'onduleur V_{an} (V) «avec V_v constante ».

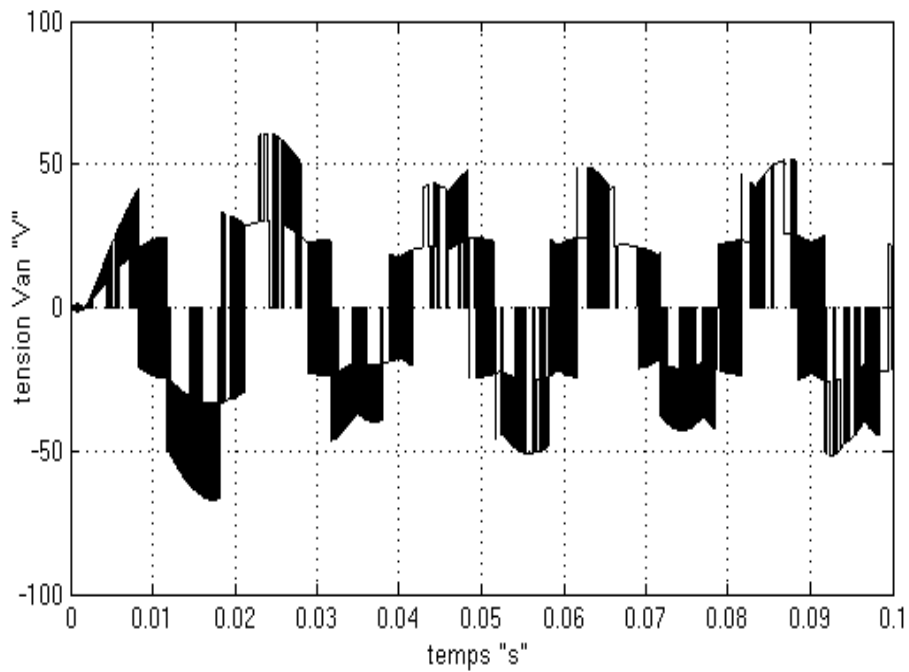


Figure 4.20 : Tension à la sortie de l'onduleur V_{an} (V) «avec V_v variable».

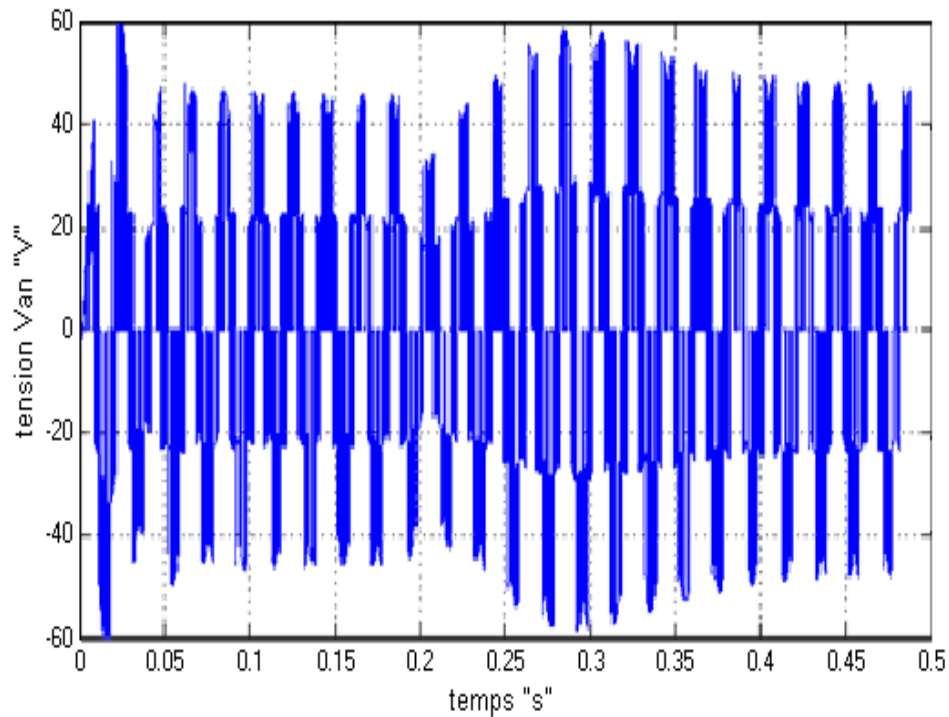


Figure 4.21 : Tension à la sortie de l'onduleur V_{an} (V) « Avec profil du vent réel ».

Les figures (4.19), (4.20) et (4.21) montrent l'évolution de la tension phase V_{an} à la sortie de l'onduleur en fonction du temps.

Il est clair que le profil du vent influe sur l'amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur pour un vent constant l'amplitude est constante l'onduleur délivre alors une tension MLI d'amplitude constante cas de la figure (4.19).

Pour un vent variable ($9\pm 1\text{m/s}$) l'amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur varie peu, cette variation dans une bande de ($\pm 5\text{V}$) n'influe pas beaucoup sur la charge que alimente la chaîne, cas de la figure (4.20).

Pour un profil du vent (réel) (voir figure 2.3) qui varie entre deux valeurs 6m/s et 12m/s entraîne une variation considérable ($\pm 20\text{V}$) dans l'amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur ce qui influe beaucoup sur la charge que alimente la chaîne, cas de la figure(4.21).

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a pu voir la complexité que pose la modélisation d'une telle chaîne de conversion d'énergie du vent.

Une maîtrise de certains domaines permet d'avoir une idée sur ce qui se passe réellement dans le système.

Avant de faire un choix sur le système de conversion éolienne, une donnée nécessaire doit être connue, c'est le profil du vent et sa variabilité.

Si le vent présente un grand écart entre sa valeur maximale et minimale un dispositif de régulation soit mécanique ou électronique (MPPT) ou autre, est nécessaire pour avoir une bonne qualité d'énergie.

Si le vent ne présente pas un grand écart entre sa valeur maximale et minimale disant ($\pm 10\%$) une chaîne entièrement passive assure une bonne qualité d'énergie, on obtient alors un système dont le fonctionnement est naturel (sans commande) donc à priori, très fiable et à coût minimum.

Conclusion générale

Afin de protéger notre environnement et sauvegarder notre planète, la production des énergies propres et durables intéressent de plus en plus les pays, comme fût le cas lors des accords de Kyoto et récemment lors de la conférence de Bali, en décembre 2007, où 187 pays étaient présents pour la relève du défi climatique post 2012.

L'Algérie comme tous les pays du monde s'intéressent à son tour à ces énergies dites propres et renouvelables en général, et à la filière éolienne en particulier.

Le développement de ces énergies est en continuelle progression, grâce aux différentes recherches et études effectuées de part le monde.

Dans ce contexte nous nous sommes intéressés à la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal.

Un état de l'art des systèmes éoliens a été présenté. La théorie des aérogénérateurs et leur principe de fonctionnement ainsi que les différents types ont été abordés en détails.

Nous avons abordé aussi les différentes architectures couramment utilisées dans les systèmes éoliens de petite puissance, ainsi que les différentes méthodes de commande et de contrôle employées pour améliorer leur efficacité énergétique. Dans cette gamme de puissance, un intérêt particulier est porté sur une structure éolienne passive qui présente de grands avantages aux niveaux, du coût, de la sûreté de fonctionnement et de la fiabilité.

L'énergie éolienne est prometteuse en Algérie., un modèle de vent a été proposé pour notre simulation, la turbine est par la suite été modélisée et simulée.

En se basant sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices La modélisation sous forme d'équations mathématiques de la génératrice synchrone à aimants permanents (MSAP) a été abordée en détails, puis, on a modélisé le convertisseur statique composé du pont de diode et de l'onduleur de tension. Le principe de fonctionnement du pont de diode et de l'onduleur on été présenté.

La commande de l'onduleur de tension triphasée a été traitée en donnant les principes de l' MLI sinusoïdale.

Les résultats obtenus sur les différentes simulations des différents éléments constituant la chaîne de conversion éolienne montrent que le régime transitoire est d'une très courte durée pour certains comme l'onduleur et le redresseur par contre pour la génératrice et la turbine le temps de réponse est beaucoup plus important.

Avant de faire un choix sur le système de conversion éolienne, une donnée nécessaire doit être connue, c'est le profil du vent et sa variabilité. C'est la conclusion qu'on peut tirer de la simulation du système complet pour différents profils du vent.

Le domaine pluridisciplinaire des aérogénérateurs fait appel à de nombreuses compétences, allant de la mécanique des fluides, à la résistance des matériaux, en passant par le génie électrique.

Vu le potentiel énergétique assez important dont dispose l'Algérie, il serait judicieux et opportun de s'investir dans l'étude, l'installation et le suivi d'éoliennes de petites puissances, ainsi que dans les systèmes hybrides éolien solaire.

Nous espérons et projetons comme perspectives :

- Une génération du profil de vent à partir de données expérimentales.
- Une interconnexion avec d'autres sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque).
- Un stockage de l'énergie récupérée par la turbine.

Références bibliographiques

- [01] P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [02] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [03] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne, "<http://www.windpower.org/fr/core.htm>".
- [04] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes" technique de l'ingénieur traité génie mécanique, BM 4640 ,N° de volume : BL3
- [05] E. Hau, "Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics", Editions Springer, 2000.
- [06] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [07] A. D. Diop, "Contribution au Développement d'un Simulateur Electromécanique d'Aérogénérateurs : Simulation et Commande en Temps Réel d'une Turbine de Puissance Moyenne à Angle de Calage Variable", Thèse de doctorat, Université du Havre, 8 juillet 1999.
- [08] S. Müller, Deike, R.W. De Doncker, « Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor », CDROM of the IEEE IAS Conf., oct. 2000.
- [09] P. Bauer, S.W.H. De Haan, C.R. Meyl, JTG. Pierik, "Evaluation of Electrical Systems for offshore Wind farms ", CDROM of the IEEE IAS Conf., oct. 2000.
- [10] A. Tounzi « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité. », Journées électrotechnique du club EEA, 28-29 janvier 1999, Paris.
- [11] X.Roboam « Le "petit éolien" : marchés, applications, architectures et gestion d'énergie ». Revue REE, Vol. 5 01/05/2005
- [12] M.Dali, J. Belhadj, X. Roboam , J.M. Blaquiere, 'Control and Energy Management of a Wind-Photovoltaic Hybrid System, EPE conference, Aalborg, Suede, September 2007.
- [13] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed, "Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance", Electrotechnique du Futur 2001 nov. 2001, Nancy France, pp.17-22.

- [14] J.R Didat " Etude de l'association des convertisseurs de puissance dans une chaîne éolienne de petite puissance" thèse université Montpellier II – Sciences et techniques du Languedoc, 2006.
- [15] A. Mirecki, X. Roboam, Member, IEEE, and F.Richardeau, "Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines" IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, NO. 1, February 2007.
- [16] A. Mirecki" Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, " thèse INP Toulouse, 2005
- [17] A. Abdelli "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive"Thèse préparée au Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie, Unité Mixte CNRS-INPT-UPS N°5213, Octobre 2007.
- [18] L. Abdelhamid "Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens"Mémoire Magister Université de Batna, 2008.
- [19] Ameer, A. "Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants doté d'un observateur d'ordre complet à mode glissant". Thèse de magistère en électrotechnique université de Batna, 2003.
- [20] O. Fadli, "Modélisation et commande non linéaire de l'association : machine synchrone à aimant permanent-onduleur de tension à trois niveaux," Thèse de Magister de l'Université de Batna, Algérie, Juin 2004
- [21] Babak, N. "Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones a aimants: méthodes, convergence, robustesse, identification "en ligne" des paramètres". Thèse de Doctorat l'Université de Téhéran, Iran, 2001.
- [22] M.S. Merzoug "Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) " Mémoire Magister Université de Batna, 2008.
- [23] V.Rogez "Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application a l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire". Thèse de doctorat, Université d'Artois, 17/12/2004
- [23] F. Poitiers "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne "Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, décembre 2003

Annexe

Documentation Eolienne:

Type	AC 750
Generateur à aimants permanents	16 poles
Puissance crête	750 W
Vitesse de vent nominale	9.5 m/s
Vitesse de vent de démarrage	3 m/s
Vitesse de vent maximale	60 m/s
Vitesse de rotation	600 tr/min
Nombre de pales	3
Matériau des pales	GFK/FRP
Diamètre du rotor	240 cm
Surface balayée	4.5 m ²
Type de contrôle	stall
Section de câble	3*2.5mm ²
poids	43Kg

