

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Seddik Benyahia
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Électronique

THÈSE

Présentée pour l'obtention du Diplôme de
Doctorat en sciences

Spécialité : Électronique

Par :
MESSADI Manal

THÈME

Modélisation et commande des éoliennes à vitesse variable

Soutenue le : 21/05/2017 devant le Jury composé de :

Président :	Abdelkrim BOUKABOU	Professeur	Université de Jijel
Rapporteur :	Adel MELLIT	Professeur	Université de Jijel
Examineur :	Djamel BENATIA	Professeur	Université de Batna
Examineur :	Hamid HAMICHE	MCA	Université de Tizi Ouzou

Remerciements

Avant tous, je remercie Dieu pour son aide pendant ces longues années pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur Mellit Adel, Professeur à l'Université de Jijel, et à Monsieur Malek GHANES, professeur à l'école ENSEA (France), pour leurs aides, leurs nombreuses remarques et leurs patiences.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur Abdelkrim BOUKABOU, Professeur à l'Université de Jijel, pour avoir accepté d'être le président de jury, Monsieur Djamel BENATIA, Professeur à l'Université de Batna et à Monsieur Hamid HAMICHE, Maître de Conférences A à l'Université de Tizi-Ouzou d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, je tien à adresser mes sincères remerciements à tous mes enseignants et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ma formation.

Liste de Publications

Publications internationales

- MESSADI, M. et MELLIT, A. Control of chaos in an induction motor system with LMI predictive control and experimental circuit validation. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2017, vol. 97, p. 51-58. (IF=1.611)
- MESSADI, Manal, MELLIT, Adel, KEMIH, Karim, *et al.* Predictive control of a chaotic permanent magnet synchronous generator in a wind turbine *Chinese Physics B*, 2015, vol. 24, no 1, p. 010502 (IF=1.436)
- Messadi, M., Mellit, A., Kemih, K., & Ghanes, M. (2014). CGPC Control of Chaos in a Permanent Magnet Synchronous Motor Using the Gradient Conjugate and the Genetic Algorithm, *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, Vol. 17, N 2. - P.186-187, 2014

Conférences internationales

- M. Messadi, A. Mellit, K. Kemih, CGPC control of chaos in permanent magnet synchronous motor using gradient conjugate and genetic algorithm, International Seminar "Nonlinear Phenomenology Advances", Saint Petersburg, Russia, 2013, ISBN: 978-5-7422-4094-5
- M. Messadi, A. Mellit, Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using the Passive Feedback Control Method, The first International Conference on Nanoelectronics, Communications and Renewable Energy, Jijel, Algeria, pp 498-504, 2013, ISBN: 978-81-925233-8-5

Table des matières

Liste des Figures

Liste des tableaux

La liste des abréviations, des sigles et des acronymes

Introduction général1

Chapitre 1 : État de l'art sur les énergies renouvelables : Éoliennes

1.1.	Introduction	7
1.2.	Les différentes formes d'énergies renouvelables	8
1.2.1.	L'énergie solaire photovoltaïque.....	8
1.2.2.	Le solaire thermique haute température	9
1.2.3.	Le solaire thermique basse température	10
1.2.4.	La biomasse.....	11
1.2.5.	L'énergie hydraulique – Hydroélectricité	11
1.3.	L'énergie éolienne	12
1.3.1.	Évolution des éoliennes.....	12
1.3.2.	Un bref aperçu sur l'énergie éolienne en Algérie	17
1.3.3.	Les différents types d'éoliennes.....	18
1.3.3.1.	Éoliennes à axe vertical	18
1.3.3.2.	Machines à axe horizontal.....	22
1.3.4.	Le développement des machines de grande puissance.....	23
1.3.5.	Applications des éoliennes	24
1.3.6.	Avantages et inconvénients de l'électricité générée par le vent	25
1.4.	Conclusion.....	26
1.5.	Bibliographie	Erreur ! Signet non défini. 6

Chapitre 2 : Modélisation d'une éolienne à vitesse variable

2.1.	Introduction	29
2.2.	Conception d'une éolienne	29
2.3.	Classification des éoliennes.....	31
2.3.1.	Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé	31
2.3.2.	Classification des éoliennes suivant la vitesse de rotation	32
2.3.2.1.	Eolienne à vitesse fixe	32
2.3.2.2.	Éolienne à vitesse variable.....	33

Table des matières

2.4.	Modélisation d'une éolienne à vitesse variable	34
2.4.1.	Modélisation du vent	34
2.4.2.	Modèle aérodynamique	35
2.4.2.1.	Aérodynamique de la pale	35
2.4.2.2.	Aérodynamique du rotor	36
2.4.3.	Modèle du multiplicateur	39
2.4.4.	Modélisation de la turbine	40
2.4.5.	Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents / générateurs	41
2.5.	Conclusion	46
2.6.	Bibliographie	46

Chapitre 3 : Contribution à la commande MPPT des éoliennes à vitesse variable

3.1	Introduction	51
3.2	Zones de fonctionnement des éoliennes	52
3.3	Description de l'algorithme MPPT proposé pour les générateurs éoliens	53
3.3.1.	MPPT par optimisation par essaims particulières	54
3.4.	La stabilisation par la commande passive	58
3.4.1.	Présentation de la commande passive	58
3.4.2.	Application de la commande passive pour le contrôle de la machine PMSG	60
3.5.	Conclusion	65
3.6.	Bibliographie	65

Chapitre 4 : Commande prédictive d'une éolienne à comportement chaotique

4.1.	Introduction	71
4.2.	Rappel sur les systèmes chaotiques	72
4.2.2.	Propriétés des systèmes chaotiques	72
4.2.2.1.	Sensibilité aux conditions initiales	73
4.2.2.2.	Aspect aléatoire	73
4.2.2.3.	Systèmes chaotiques et méthode de Lyapounov :	74
4.3.	La commande prédictive à retour d'état :	76
4.3.1.	La théorie de la commande prédictive à retour d'état	76
4.4.	Application de la commande prédictive à retour d'état pour le contrôle de des éoliennes à comportement chaotique suite aux défauts dans leurs moteurs	79

Table des matières

4.4.1. Modélisation mathématique des générateurs à comportement chaotique dû aux défauts des composants.....	79
4.2.2. Modélisation mathématique des générateurs à comportement chaotique dû aux défauts de la commande.....	90
4.5. Conclusion.....	96
4.6. Bibliographie.....	97
Conclusion général et perspective.....	100
Annexes.....	104

Liste des Figures

Figure 1.1 Description d'une cellule photovoltaïque	8
Figure 1.2 Centrale solaire à tour en Espagne	9
Figure 1.3 Chauffe-eau solaire	10
Figure 1.4 Centrale hydroélectrique	12
Figure 1.5 Schéma de principe du moulin de M. Parent décrit en 1735	13
Figure 1.6 Éolienne Aermotor en Algérie (Sarrazi éditeur, collection M. Rapin)	14
Figure 1.7 1 ^{re} Éolienne Darrieus avec rotor de 8 m, tiré de la revue La Nature, n° 2823, décembre 1929 (collection M. Rapin)	15
Figure 1.8 Eolienne de 100 kW de Grand Vent	18
Figure 1.9 Eolienne d'Adrar	18
Figure 1.10 Le rotor de Savonius	20
Figure 1.11 Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus.....	21
Figure 1.12 Les types d'éoliennes à axe horizontal.....	23
Figure 1.13 Représentation schématique de l'évolution des prototypes, proposés par la suite sur le marché, en fonction de leurs puissances, diamètre et masse de l'ensemble nacelle/rotor.....	24
Figure 2.1 Composition d'une éolienne.....	30
Figure 2.2 Eolienne à vitesse fixe.....	33
Figure 2.3 Eolienne à vitesse variable	33
Figure 2.4 Schéma de la turbine éolienne.....	34
Figure 2.5 Schéma bloc du vent sous matlab/simulink	35
Figure 2.6 Calage des sections pied de pale	36
Figure 2.7 Représentation du tube de courant	37
Figure 2.8 Évolution typique du rendement aérodynamique en fonction du tip-speed ratio et du modèle d'éolienne	38
Figure 2.9 Évolution du rendement aérodynamique en fonction de l'angle d'inclinaison des pales.....	39
Figure 2.10 Schémas blocs de la partie mécanique de l'éolienne sous matlab/simulink	41
Figure 2.11 Schéma de la machine synchrone	42
Figure 2.12 Schéma bloc de la machine PMSM (partie électrique d'éolienne) sous matlab/simulink.....	46

Figure 3.1 Zones de fonctionnement des éoliennes.....	52
Figure 3.2 Profil du vent.....	56
Figure 3.3 Angle d'inclinaison des pales	57
Figure 3.4 Vitesse de rotation mécanique	57
Figure 3.5 Coefficient de puissance	58
Figure 3.6 Courant I_q en fonction du temps.....	63
Figure 3.7 Courant I_d en fonction du temps.....	63
Figure 3.8 Vitesses de rotation de référence et mesurée en simulation du système éolien.	64
Figure 3.9 Puissance de référence et mesurée en simulation du système éolien.....	64
Figure 4.1 .Evolution dans le temps pour deux conditions initiales très proches.	72
Figure 4.2 Evolution dans le temps d'un système chaotique, comparé à une sinusoïde.	73
Figure 4.4 Évolution des variables d'état de la GSAP chaotique sans contrôle et l'attracteur chaotique typique avec les paramètres du système $\sigma = 5.45$, $\gamma = 20$	79
Figure 4.5 Vitesse angulaire de le GSAP chaotique contrôlé au point d'équilibre, avec un contrôleur activé à $t = 20s$ a) avec contrôleur prédictif-LMI b) la commande « Fuzzy Guaranteed Cost Controller » [27]	80
Figure 4.6 Courant i_q de le MSAP chaotique contrôlé au point d'équilibre, avec un contrôleur activé à $t = 20s$ a) avec contrôleur prédictif -LMI b) la commande « Fuzzy Guaranteed Cost Controller » [27]	81
Figure 4.7 Courant i_d de le MSAP chaotique contrôlé au point d'équilibre, avec un contrôleur activé à $t = 20s$ a) avec contrôleur prédictif-LMI b) la commande « Fuzzy Guaranteed Cost Controller » [27]	82
Figure 4.8 Profil du vent.....	83
Figure 4.9 Valeur optimale de coefficient de puissance C_p avec les AG.	84
Figure 4.10 Angle d'inclinaison des pales optimisées avec les AG.....	84
Figure 4.11 Rapport de la vitesse spécifique de la turbine optimisé par les AG.....	85
Figure 4.12 vitesse de rotation de la GSAP de référence	85
Figure 4.13 Puissance électrique produite optimisé par les AG.....	86
Figure 4.14 Vitesse de rotation contrôler par la commande predictive.....	87
Figure 4.15 Puissance de l'éolienne contrôlée par la commande predictivé.....	87
Figure 4.16 Courant I_q contrôlé par la commande prédictive.....	88
Figure 4.17 Courant I_d contrôlé par la commande prédictive.....	88
Figure 4.18 Dynamique et l'attracteur du système (4.32).....	90

Figure 4.19 Courbe de la réponse temporelle de x_1	92
Figure 4.20 Courbe de la réponse temporelle de x_2	92
Figure 4.21 Courbe de la réponse temporelle de x_3	92
Figure 4.22 Courbe de la réponse temporelle de x_4	92
Figure 4.23 Circuit électronique du système chaotique (4.32).....	93
Figure 4.24 Projection expérimentale de l'attracteur	94
Figure 4.25 Circuit électronique de la commande en temps de $x_3(t)$ avec le contrôleur LMI- prédictif.....	94
Figure 4.26 Courbe expérimentale de la réponse en temps.. en temps de $x_3(t)$ avec le contrôleur LMI- prédictif.....	95
Figure 4.27 Courbe expérimentale de la réponse en temps de $x_3(t)$ avec le contrôleur LMI- prédictif	95

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé..... 32

Tableau 4.1 Classification des régimes permanents en fonction du spectre Lyapounov 74

La liste des abréviations, des sigles et des acronymes

GSAP : Génératrice synchrone à aimant permanent

PSO : Particule Swarm Optimizaion

MPPT : Maximum Power Point Tracking

AG : Algorithm Genetic

WECS : Wind energy conversion system

TSR : type speed ratio

LMI : linear matrix inequality

PV : Panneaux photovoltaïques

GWEC : Global Wind Energy Concil « Conseil mondial de l'énergie éolienne »

NREL : National Renewable Energy Laboratory

AWEA : American Wind Energy Association

VAWT : Vertical axis wind turbine

HAWT : Horizontal axis wind turbine

PSF : Power Signal Feedback

C_p : Le coefficient de puissance

ρ : La masse volumique de l'air

R : Le rayon des pales de l'éolienne

S : L'aire de la surface balayée par le rotor

λ : Le rapport de la vitesse spécifique de la turbine

P_a : La puissance aérodynamique

β : L'angle d'inclinaison des pales.

C_t : Le couple aérodynamique

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine

J_g : L'inertie de la génératrice

$J_{turbine}$: L'inertie de la turbine.

C_{visc} : Le couple résistant dû aux frottements

f : Le coefficient de frottement visqueux.

Ω_{mec} : La vitesse angulaire mécanique disponible sur l'axe du générateur

C_{em} : Le couple électromagnétique disponible sur l'axe du générateur

C_{mec} : le couple mécanique disponible sur l'axe du générateur

V_s : Notation vectorielle des tensions des phases statoriques

I_s : Notation vectorielle des courants des phases statoriques

φ_s : Notation vectorielle des flux des phases statoriques

P : Nombre de pair de pôles.

J : Moment d'inertie total du rotor.

f : Coefficient de frottement ($(N.m.s/rad)$).

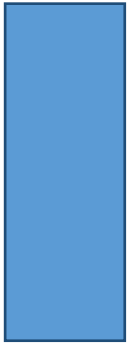
C_r : Couple résistant de la charge ($N.m$).

L_d : Inductances d'axe direct,

L_q : Inductances d'axe en quadrature.,

R_s : Résistance des enroulements statoriques,

ϕ_f : Flux induit par les aimants permanents



Introduction générale

L'énergie a un rôle très essentiel au développement économique et social de tous les pays au monde, et la croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement [1].

Grâce à ces sources d'énergie, l'être humain a pu se chauffer, faire cuire ses aliments, et produire de l'électricité nécessaire pour faciliter sa vie, mais ça était au détriment de l'environnement [2]. Effectivement les centrales électriques qui produisent de l'électricité sont impliquées dans l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (la principale cause du réchauffement climatique) ainsi que les déchets radioactifs qui sont stockés en grande profondeur issus de l'utilisation de l'uranium mettent en danger la santé des générations futures [3].

Il est bien connu que ces ressources d'énergie fossile sont limitées, et la production mondiale du pétrole, gaz et charbon se rapproche à l'épuisement, donc il viendra le jour où il n'y aura pas de couverture de la demande de ces centrales, des solutions alternatives à ces énergies sont donc en voies vers lesquelles notre société toute entière doit s'engager, ces solutions à base des énergies renouvelables comme le soleil, l'eau la mer et le vent...etc.

Appelées aussi, énergies vertes ces sources ont été utilisées depuis longtemps par l'homme pour subvenir à ses besoins. Actuellement ils les utilisent pour produire de l'électricité, les rayons solaires sont utilisés en énergie photovoltaïque, l'énergie hydroélectrique utilise l'eau des barrages, l'énergie marémotrice utilise le mouvement de l'eau de mer créée par les marées et l'énergie éolienne utilise la force du vent et elle tire son nom d'Eole (en grec ancien Αἴολος, Aiolos), le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique [4].

Le vent qui est un type d'énergie solaire libre, propre et inépuisable, proviens du chauffage irrégulier dans l'atmosphère, des irrégularités de la surface terrestre et de la rotation de la Terre sa puissance à des fins de production fascine les hommes depuis des milliers d'années [5].

L'homme utilise donc depuis de nombreux siècles l'énergie éolienne, d'abord pour naviguer sur les mers puis pour pomper l'eau et moudre le grain. Les petits moulins à vent ont été développés dans le Moyen-Orient surtout en Perse, il y a plus de deux mille ans. Mille ans plus tard, les Hollandais raffinent le moulin à vent pour pomper l'eau hors leurs terres inondées. Au moyen âge, les moulins à vent ont été introduits en Europe, principalement pour des tâches mécaniques telles que le pompage de l'eau, le broyage de pierre...etc, vers la fin du XIX^e siècle, les Américains ont fait des moulins plus efficaces et plus légers avec des lames en acier rapide (au lieu des lames en bois qui ont été utilisés pendant des siècles). Mais l'utilisation pour produire de l'électricité est récente. Ce n'est que dans les années 1887-1888, que l'Américain Charles F. Brush a construit la première éolienne, qui produit du courant pour 12 batteries, à la fin du XIX^e siècle, Poul la Cour conçoit plusieurs éoliennes expérimentales. L'éolienne expérimentale de Poul la Cour existe toujours à Askov (Danemark). Puis, pendant la première moitié du XX^e siècle, les éoliennes sont progressivement confrontées à la concurrence croissante des centrales au charbon et du réseau électrique au niveau national. Cependant, en raison des pénuries de charbon et du pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne se maintient. C'est en 1957, que Johannes Juul crée la turbine Gedser, qui sert de modèle aux éoliennes modernes [6].

L'énergie éolienne présente des avantages importants, c'est une énergie complètement propre, elle n'émet ni gaz à effet de serre ni déchet, son fonctionnement ne pollue ni l'atmosphère ni la terre en effet, elle est pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques pour obtenir de l'électricité, cette énergie convertie en électricité est une ressource abondante, gratuite et illimitée à l'échelle humaine. C'est l'une des méthodes les plus utilisées pour produire de l'électricité et la plus prometteuse avec un taux de croissance de 20%, elle pourra fournir 12% des besoins mondiaux d'électricité en 2020 [7-8].

Pour produire de l'électricité, l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, c'est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique du vent. De nombreux travaux de

recherche sur le contrôle et la commande d'éoliennes ont été menés [9-11]. Grâce à ces travaux, les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation pitch. Il est ainsi possible de modifier la vitesse de rotation et l'angle d'inclinaison de chacune des pales, permettant alors d'améliorer la production de l'aérogénérateur. Néanmoins, il reste encore à introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement des aérogénérateurs. Pour cela, on sera amené à utiliser de plus en plus les techniques de l'automatique avancée (modes glissants, commande prédictive, commande passive, observateur grand gain, entre autres).

Ainsi l'objectif principal de nos travaux de thèse est d'étudier les techniques de commande robuste, de la génératrice, susceptible d'optimiser la production d'une éolienne, en particulier celle équipée d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), ce choix avait été motivé par la baisse des coûts des aimants, cette génératrice semble promise à un bel avenir. C'est principalement parce que les éoliennes équipées des GSAPs ont un rendement élevé et ils réduisent le coût d'exploitation de l'entretien, car son schéma n'utilise pas la boîte de vitesse. Ces éoliennes peuvent être contrôlées par le fonctionnement du suivi de puissance maximum MPPT (Maximum Power Point Tracking) de l'éolienne dans une large plage de vitesse du vent.

La puissance de sortie d'une éolienne dépend de la précision avec laquelle les points de puissance de crête sont suivis par le contrôleur MPPT du système de commande, quel que soit le type de générateur utilisé. Plusieurs approches d'extraction de la puissance éolienne maximale en fonction de la vitesse du vent ont été développées dans la littérature, à savoir la commande TSR (Type speed Ratio), la commande par rétroaction du signal de puissance PSF (Power Signal Feedback)... etc [12-13].

La commande TSR régule la vitesse de rotation du générateur afin de maintenir le TSR à une valeur optimale à laquelle la puissance extraite est maximale. Cette méthode exige que la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine soient mesurées (l'utilisation des capteurs) en plus la nécessiter de la connaissance du TSR optimum de la turbine pour que le système puisse extraire la puissance maximale possible [14].

Dans le cadre de notre travail, on s'intéresse à cette approche de régulation, on propose l'utilisation d'un seul capteur pour l'estimation de la vitesse du vent au lieu de deux capteurs et l'utilisation de la méthode Optimisation par essais particuliers (PSO Particale Swarm Optimizaion) pour maximiser le coefficient de puissance et l'estimation de l'angle d'inclinaison de la pale ainsi que la vitesse de référence du générateur afin

d'extraire le maximum de puissance. De plus, on propose, l'utilisation de la commande passive pour contrôler GSAP de l'éolienne à vitesse variable afin de suivre la vitesse de référence du générateur. Le choix de ces commandes vient du fait de leurs souplesses, et leurs facilités de mise en œuvre.

Les génératrices des éoliennes peuvent avoir des problèmes et des défaillances dues à des pannes internes ou externes [15-16]. Des défaillances externes surviennent par exemple en raison des courts-circuits dans le réseau qui entraîneront les surchauffes des générateurs, tandis que Les défaillances internes sont habituellement en raison de la mauvaise isolation ou des défaillances mécaniques telles que les roulements ou les composants. Ces défaillances engendrent un comportement chaotique à ces génératrices [17].

Cependant, ce comportement chaotique va non seulement affecter la stabilité du système, la sécurité, et même mettre en danger son système de charge. Par conséquent, sur la base des problèmes du préjudice porté par le chaos dans le système, il est impératif d'adopter des méthodes de commande efficaces pour supprimer et éliminer les phénomènes chaotiques dans le fonctionnement de la machine lorsque le GSAP chaotique provoque l'instabilité du système moteur.

Pour remédier à ce problème, on propose l'application de la commande prédictive associée au LMI (« linear matrix inequality » Inégalité matricielle linéaire).pour commander les éoliennes lors de ce genre de scénario. Deux cas de défauts ont été étudiés, le premier cas c'est le comportement chaotique suite à la défiance des composants passifs du moteur. Et le deuxième cas, suite à l'échec de la commande PI.

Ce manuscrit s'articule suivant quatre chapitres comme suit:

Dans le premier chapitre, les différentes formes d'énergies renouvelables sont détaillées à savoir, l'énergie solaire photovoltaïque, le solaire thermique haute température, le solaire thermique basse température, la biomasse et l'énergie hydraulique – Hydroélectricité. Suivi d'un historique sur l'énergie éolienne et un bref aperçu de cette énergie en Algérie. À la fin de ce chapitre, les différents types des éoliennes sont présentés avec les avantages et les inconvénients de l'électricité générée par le vent.

Le deuxième chapitre est consacré aux notions générales sur l'énergie éolienne. Les technologies d'éoliennes, les différents composants constituant l'aérogénérateur, le principe de fonctionnement, son modèle mathématique associé ainsi qu'une étude détailler

du modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent, ses avantages incontestés dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne seront présentés.

Dans la première partie du troisième chapitre, on traite le problème de poursuite du point de puissance maximale MPPT d'un système éolien ainsi que la commande de la génératrice. Dans cette optique, on propose l'amélioration de l'approche de commande du rapport de vitesse spécifique TSR en proposant l'utilisation de l'optimisation par essais particuliers pour maximiser le coefficient de puissance et l'estimation de l'angle d'inclinaison de la pale ainsi que la vitesse de rotation de référence du générateur afin d'extraire le maximum de puissance et réduire le nombre de capteurs. Dans la deuxième partie de ce chapitre, la commande passive est appliquée pour commander la GSAP afin de suivre la vitesse de référence du générateur estimé à partir des PSO.

Enfin, le dernier chapitre abordera le problème du comportement chaotique des éoliennes suites à deux types de défauts, à savoir défaut des composants passifs du générateur et défauts de la commande PI. Une nouvelle loi de commande a été proposée pour commander l'éolienne lors de ce genre de problème, elle repose sur l'association de la commande prédictive et les LMI.

Une conclusion générale et perspective sera présentée à la fin du manuscrit.

Bibliographie

- [1] CHEVALIER, Jean-Marie, *et al. Les nouveaux défis de l'énergie: climat, économie, géopolitique*. Paris Dauphine University, 2009.
- [2] MIRECKI, Adam. *Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*. 2005. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [3] LE GOURIÈRES, Désiré. *Énergie éolienne: Théorie, conception et calcul pratique des installations*. In : *Energie éolienne: théorie, conception et calcul pratique des installations*. Eyrolles, 1982.
- [4] CAMBLONG, Haritza. *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*. 2003. Thèse de doctorat. Paris, ENSAM.
- [5] ADARAMOLA, Muyiwa (ed.). *Wind Resources and Future Energy Security: Environmental, Social, and Economic Issues*. Apple Academic Press, 2015.

- [6] WAGNER, Hermann-Josef et MATHUR, Jyotirmay. *Introduction to wind energy systems: basics, technology and operation*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [7] BOYLE, Godfrey, *et al.* *Renewable energy: power for a sustainable future*. OXFORD university press, 1997.
- [8] BURTON, Tony, SHARPE, David, JENKINS, Nick, *et al.* *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, 2001.
- [9] BOSSANYI, E. A. Wind turbine control for load reduction. *Wind energy*, 2003, vol. 6, no 3, p. 229-244.
- [10] TAPIA, Arantxa, TAPIA, Gerardo, OSTOLAZA, J. Xabier, *et al.* Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on energy conversion*, 2003, vol. 18, no 2, p. 194-204.
- [11] EKANAYAKE, Janaka et JENKINS, Nick. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency. *IEEE Transactions on Energy conversion*, 2004, vol. 19, no 4, p. 800-802.
- [12] ABDULLAH, M. A., YATIM, A. H. M., TAN, C. W., *et al.* A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012, vol. 16, no 5, p. 3220-3227.
- [13] CHEN, Zhe, GUERRERO, Josep M., et BLAABJERG, Frede. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. *IEEE Transactions on power electronics*, 2009, vol. 24, no 8, p. 1859-1875.
- [14] TAFTICHT, Tahar. *Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien*. 2006. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [15] YANG, Wenxian, TAVNER, P. J., et WILKINSON, M. R. Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine synchronous generator drive train. *IET Renewable Power Generation*, 2009, vol. 3, no 1, p. 1-11.
- [16] ROTHENHAGEN, Kai et FUCHS, Friedrich Wilhelm. Doubly fed induction generator model-based sensor fault detection and control loop reconfiguration. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no 10, p. 4229-4238.
- [17] LI, Zhong, PARK, Jin Bae, JOO, Young Hoon, *et al.* Bifurcations and chaos in a permanent-magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2002, vol. 49, no 3, p. 383-387.

Chapitre 1

État de l'art sur les énergies renouvelables : Éoliennes

Sommaire

1.1.	Introduction	7
1.2.	Les différentes formes d'énergies renouvelables	8
1.2.1.	L'énergie solaire photovoltaïque.....	8
1.2.2.	Le solaire thermique haute température	9
1.2.3.	Le solaire thermique basse température	10
1.2.4.	La biomasse.....	11
1.2.5.	L'énergie hydraulique – Hydroélectricité	11
1.3.	L'énergie éolienne	12
1.3.1.	Évolution des éoliennes.....	12
1.3.2.	Un bref aperçu sur l'énergie éolienne en Algérie	17
1.3.3.	Les différents types d'éoliennes	19
1.3.3.1.	Éoliennes à axe vertical	19
1.3.3.2.	Machines à axe horizontal.....	22
1.3.4.	Le développement des machines de grande puissance.....	23
1.3.5.	Applications des éoliennes	24
1.3.6.	Avantages et inconvénients de l'électricité générée par le vent	25
1.4.	Conclusion.....	26
1.5.	Bibliographie	26

Chapitre 1

État de l'art sur les énergies renouvelables : Éoliennes

1.1. Introduction

La consommation d'énergie électrique devient de plus en plus courante et indispensable. Autrefois, l'homme des cavernes avait seulement besoin d'un feu de bois pour se chauffer et cuire son alimentation, de nos jours, nos besoins en énergie sont considérablement changés et augmentés (chauffage, déplacement, éclairage, communication...); cette consommation d'énergie ne peut pas croître à l'infini sans devenir une menace pour la planète et par conséquent pour l'avenir de l'homme. Donc on doit consommer moins d'énergie par un changement de comportement et par la recherche des systèmes moins énergivores ainsi que d'autres formes de production d'énergie qui perturbent moins le fonctionnement naturel de la planète terre.

Les principales sources d'énergie utilisées aujourd'hui sont d'origine fossile ou nucléaire. Les énergies fossiles sont épuisables et émettent des rejets carbonés et engendrent alors une augmentation des gaz à effet de serre, et les terribles accidents de Harrisburg (1979), Tchernobyl (1986) et récemment Fukushima (2011), nous amènent à réfléchir sur les limites de l'énergie nucléaire.

Pour répondre à cette recherche de solutions alternatives aux énergies fossiles ou nucléaires, nous trouvons plusieurs filières parmi lesquelles, les panneaux solaires, les hydroliennes, la biomasse et bien sûr les éoliennes, ces énergies appelées aussi les énergies vertes, leurs intérêts et qu'elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets toxiques et radioactifs.

Dans les paragraphes suivants, on va expliquer brièvement le principe de fonctionnement de chaque énergie, mais avec plus de détails pour l'énergie éolienne, qui fait l'objet de cette thèse, utilisé pour produire de l'électricité.

1.2. Les différentes formes d'énergies renouvelables

1.2.1. L'énergie solaire photovoltaïque [6-10]

Les cellules solaires, également appelées cellules photovoltaïques (PV), elles convertissent la lumière solaire directement en électricité. PV tire son nom du processus de conversion de la lumière (photons) à l'électricité (tension), qui est appelé l'effet photovoltaïque. Ce dernier a été découvert en 1954, lorsque les chercheurs de Bell Telephone découvrent que le silicium (un élément trouvé dans le sable) à créer une charge électrique lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil. Les cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs à base de silicium, de sulfure de cadmium et de tellure de cadmium. Il y a en effet de plaques fines (couche inférieure et couche supérieure) pour un contact étroit. La couche supérieure est constituée de silicium et d'autres éléments possédant plus d'électrons qu'une couche de silicium pure. La couche inférieure est constituée de silicium et d'autres éléments possédant moins d'électrons qu'une couche de silicium pure.

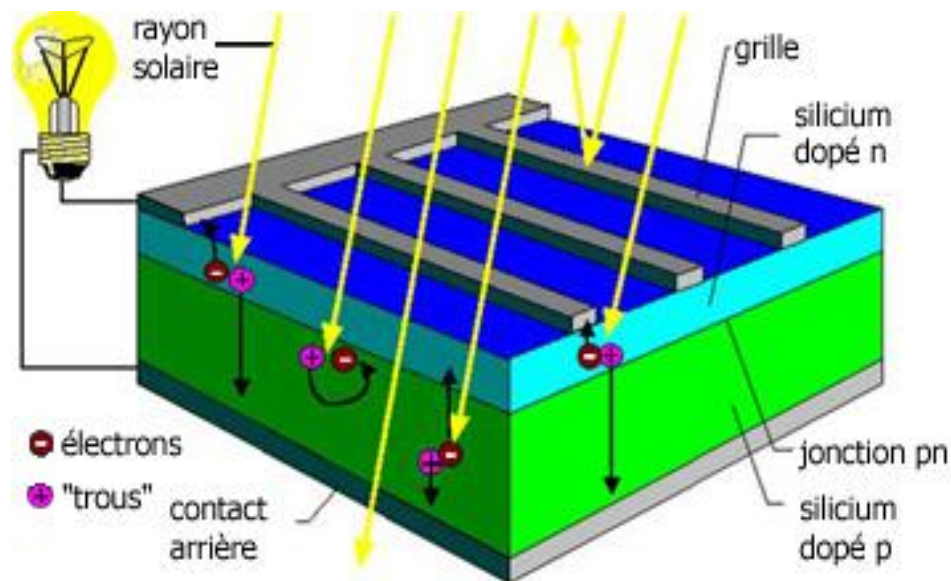


Figure 1.1 Description d'une cellule photovoltaïque

Aujourd'hui, des milliers de personnes alimentent leurs foyers et les entreprises avec des systèmes photovoltaïques individuels, des Sociétés de services publics utilisent également la technologie photovoltaïque pour les grandes centrales électriques. Les panneaux solaires utilisés pour alimenter les maisons et les entreprises sont généralement fabriqués à partir de cellules solaires combinées en modules qui détiennent environ 40 cellules. Une maison typique utilise environ 10 à 20 panneaux solaires pour alimenter la maison. Les panneaux sont montés à un angle fixe faisant face au sud, où ils peuvent être montés sur un dispositif

de suivi qui suit le soleil, ce qui leur permet de capturer le plus d'ensoleillement. De nombreux panneaux solaires combinés ensemble pour créer un seul système est appelé un panneau solaire. Pour les grandes applications utilitaires ou industrielles électriques, des centaines de panneaux solaires sont reliés entre eux pour former un grand système photovoltaïque.

1.2.2. Le solaire thermique haute température [12]

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400° C et 1 000° C.

La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un générateur qui produit de l'électricité, c'est l'héliothermodynamie.

Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

- Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.
- Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour (voir figure 1.2).
- Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire.



Figure 1.2 Centrale solaire à tour en Espagne [12]

1.2.3. Le solaire thermique basse température [13]

L'histoire des capteurs thermiques à basse température remonte à H. B. de Saussure qui met en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé. Il faut cependant attendre 1910 pour voir apparaître les premiers chauffe-eaux solaires en Californie. Comme beaucoup de filières d'énergies renouvelables, le solaire thermique a connu une phase de croissance importante entre 1973 et 1985 en réaction au choc pétrolier. Mais ce développement rapide, avec des technologies ou des installateurs déficients, a entraîné de nombreuses contre-performances. Depuis la fin des années 90, quelques pays ont relancé des programmes de soutien au développement du solaire thermique : l'Autriche, l'Allemagne, la Chine et plus récemment l'Espagne.

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus. Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un plancher solaire direct".

Tous les dispositifs qui agissent comme capteurs solaires thermiques sont de plus en plus intégrés dans les projets d'architecture bioclimatique (maisons solaires, serres, murs capteurs, murs Trombe...).

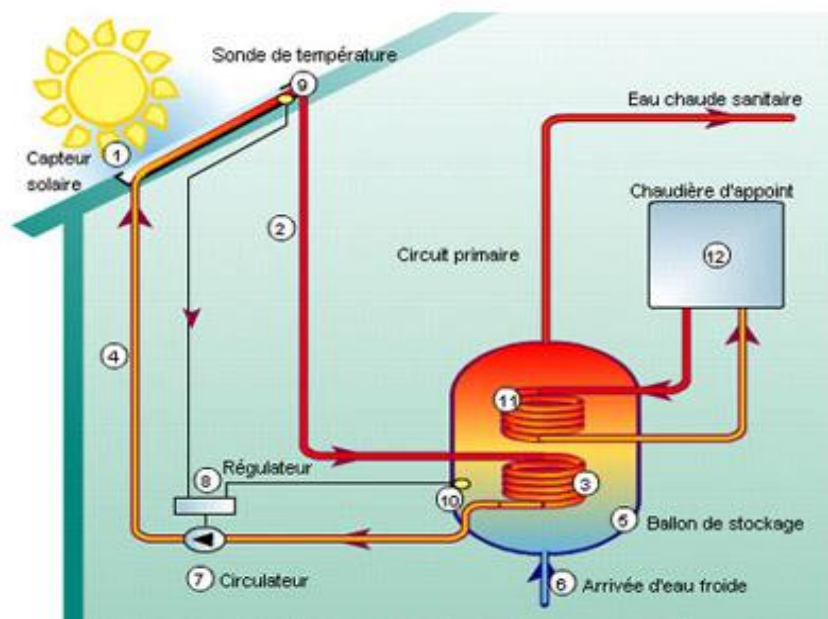


Figure 1.3 Chauffe-eau solaire [13]

1.2.4. La biomasse [14]

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de produire de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasse.

La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres. Il y a trois types d'énergie biomasse :

- *Bois énergie* : c'est la plus ancienne source d'énergie utilisée par l'homme. Et bien que peu utilisé en Europe aujourd'hui, il reste la première source d'énergie pour plusieurs milliards de personnes dans le monde (cuisine et chauffage).
- *Le biogaz* : est produit à partir de déchets biodégradables. Il ressemble au gaz naturel, mais n'est pas une énergie fossile
- *Les biocarburants* : sont fabriqués à partir de produits de l'agriculture (blé, colza, maïs, etc.). Ils peuvent être utilisés en remplacement de l'essence, du fioul ou du gasoil, ou mélangés en petites quantités dans ces carburants.

1.2.5. L'énergie hydraulique – Hydroélectricité [15]

L'énergie hydroélectrique met à profit l'énergie de l'eau qui se déplace d'un point haut vers un point bas, essentiellement pour produire de l'électricité. Les projets de production d'énergie hydroélectrique englobent des projets de barrages-réservoirs, de centrales d'éclusées ou au fil de l'eau et de centrales dans le courant à toutes les échelles de projet. Cette diversité permet à l'énergie hydroélectrique de répondre aux importants besoins urbains centralisés ainsi qu'aux besoins ruraux décentralisés. La production varie selon les aléas de l'hydraulicité (débit d'une année ou d'un mois donné par rapport à une année ou un mois considéré comme "normal").

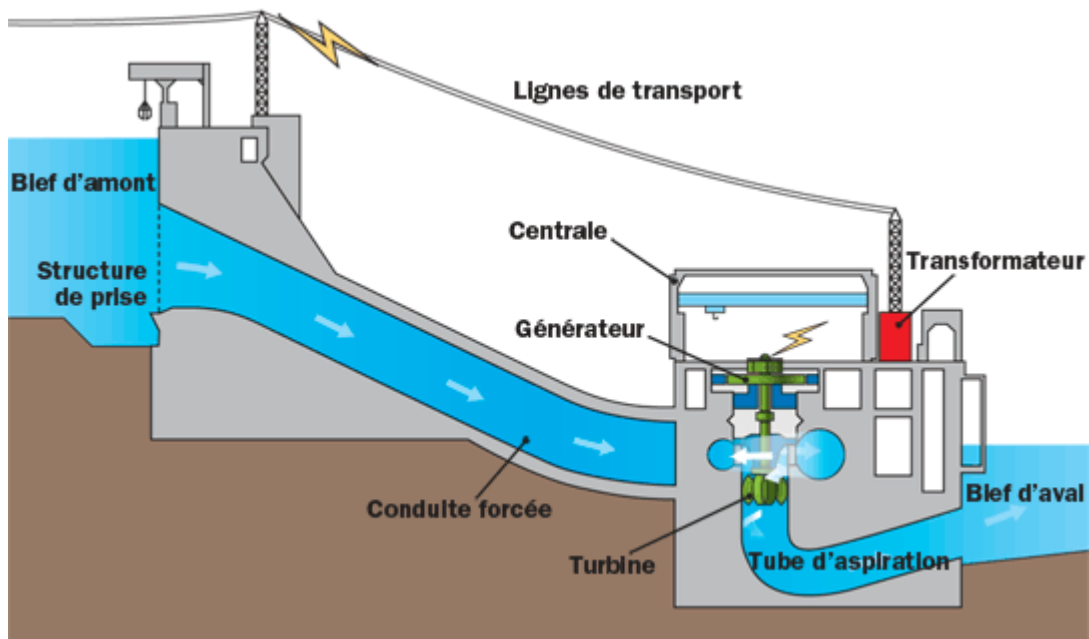


Figure 1.4 Centrale hydroélectrique [15]

1.3. L'énergie éolienne

Le terme « Énergie éolienne » décrit le processus par lequel le vent est utilisé pour produire de l'énergie mécanique ou électrique. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette puissance mécanique peut être utilisée pour des tâches spécifiques (par exemple, moulin à grain ou pomper de l'eau), ou un générateur peut convertir cette énergie mécanique en électricité pour alimenter les maisons, les entreprises, les écoles, et autres. Actuellement, des recherches approfondies sur l'énergie éolienne est en cours dans divers pays du monde, y compris les États-Unis, l'Allemagne, l'Espagne, le Danemark, le Japon, la Corée du Sud, le Canada, l'Australie et l'Inde. Il existe plusieurs organismes de recherche de l'énergie éolienne dans le monde, comme le Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), National Renewable Energy Laboratory (NREL), et American Wind Energy Association (AWEA). Selon un rapport GWEC [1], environ 12% de la demande totale d'électricité du monde peut être alimenté par l'énergie éolienne d'ici 2020. Ce chiffre indique l'importance de la recherche de l'énergie éolienne ces jours-ci.

1.3.1. Évolution des éoliennes [16-18]

- **VII^e siècle** : Utilisation en Perse (Iran actuel) de roues à énergie éoliennes rudimentaires composées d'une simple tour supportant des pales faites à partir de

roseaux attachés en paquets servant à l'irrigation des terres cultivées et pour écraser du grain

- **1100** : les premières éoliennes sont construites en Europe, elles sont inspirées de celle de Perse rencontrées lors des croisades ; et sont utilisées pour pomper l'eau et moudre le blé, ces moulins à vent son composé de quatre pâles qui tournent autour d'un axe horizontal.
- **XIV^e siècle** : Des améliorations sont apportées progressivement aux moulins à vent européens afin d'augmenter la portance aérodynamique (la « poussée ») et la vitesse du rotor. Ces améliorations permettent d'obtenir une meilleure mouture et une irrigation plus efficace. Développement en Europe et plus particulièrement aux Pays-Bas du moulin à vent pour le meulage du grain, l'irrigation des terres agricoles, le pompage de l'eau de mer, le sciage du bois, la fabrication du papier et de l'huile et le meulage de divers matériaux
- **1700** : Les turbines éoliennes font leur apparition au Canada grâce aux colons qui les utilisent pour moudre le grain.
- **Fin des années 1700** : Les moulins à vent sont l'équivalent du moteur électrique de l'Europe préindustrielle (figure 1.5). Ils fournissent environ 1 500 mégawatts (un niveau qui n'a été atteint par la suite que vers la fin des années 1980). Cette énergie éolienne est utilisée pour irriguer les terres, moudre le grain, scier le bois d'œuvre et pour traiter des produits comme les épices et le tabac.

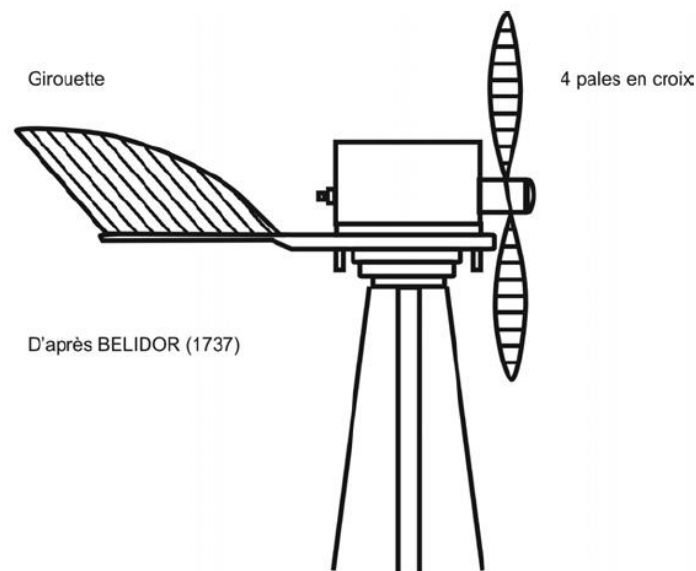


Figure 1.5 Schéma de principe du moulin de M. Parent décrit en 1735

- **1800** : Les homesteaders américains utilisent les moulins à vent pour pomper de l'eau pour alimenter leurs fermes et leurs ranchs lors de leur établissement dans l'Ouest. Les pales de ces premiers moulins à vent de ferme étaient de simples palettes de bois (figure 1.6).
- **1887-1888** : L'américain Charles F. Brush, un scientifique de Cleveland en Ohio, construit la première éolienne entièrement automatisée qui produit du courant pour 12 batteries, 350 lampes à filament, 2 lampes à arc à charbon et 3 moteurs. Haute de 17 mètres et composée de 144 pales en cèdre, elle avait une puissance de 12 kW. Jusqu'en 1920, la quasi-totalité des éoliennes seront munies de rotors à pales multiples.
- **1890** : La première éolienne dite « industrielle » permettant de générer de l'électricité est mise au point par le Danois Poul La Cour, permettant de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend soixante-douze exemplaires en 1908.

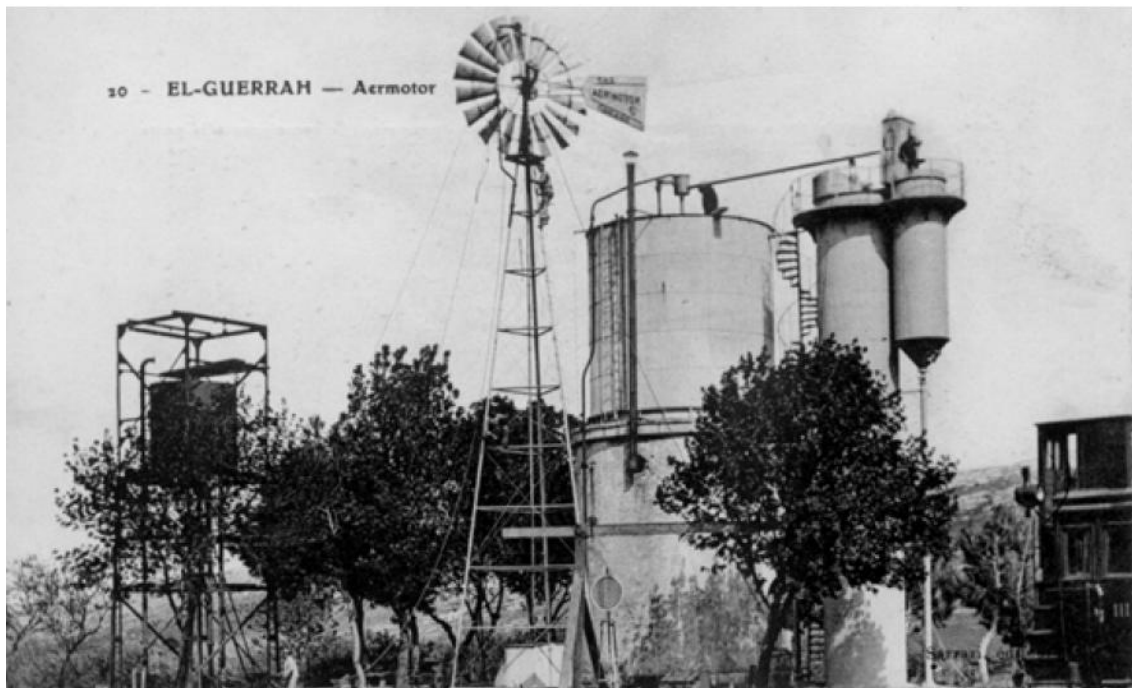


Figure 1.6 Éolienne Aermotor en Algérie (Sarrazi éditeur, collection M. Rapin)

- **1891** : l'inventeur danois Poul La Cour conçoit plusieurs éoliennes expérimentales et mène des recherches en soufflerie. Il découvre que des turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales génèrent davantage d'électricité que des turbines plus lentes composées de nombreuses pales. Il met au point les premières

éoliennes conçues à partir des principes modernes de l'aérodynamique. D'une puissance 25 kW grâce à des rotors à quatre pales elles affichent une plus grande efficacité. À la fin de la Première Guerre mondiale, l'utilisation de ces machines était largement répandue au Danemark. Cette éolienne expérimentale existe toujours à Askov (Danemark)

- **1920** : L'inventeur français Georges J.M. Darrieus développe le concept d'un rotor à axe vertical : éoliennes Darrieus.

Ce développement s'appuie sur des réflexions importantes sur les rapports entre vitesse de rotation et nombre de pales et possède déjà toutes les caractéristiques d'une éolienne moderne. L'orientation est assurée par l'inclinaison vers l'arrière des pales, qui, formant ainsi un cône en rotation, crée naturellement une surface latérale. Les pales sont de conception biplane sur une grande partie de leur envergure, ceci pour compenser la pression du vent qui tendrait à les fléchir davantage vers l'arrière. Pour compléter ses études, Darrieus réalisera ensuite deux autres prototypes de 10 et 20 m de diamètre à, respectivement, 3 et 2 pales (figure 1.7).

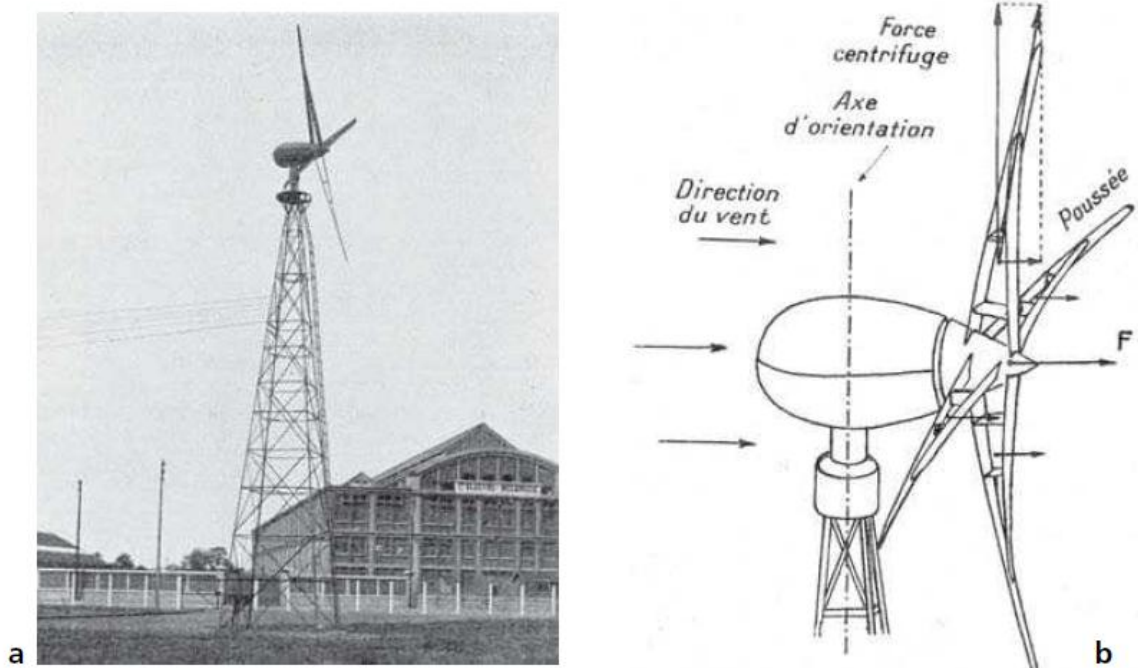


Figure 1.7 1^{re} Éolienne Darrieus avec rotor de 8 m, tiré de la revue La Nature, n° 2823, décembre 1929 (collection M. Rapin)

- **1920** : Albert Betz poursuit des recherches sur la physique et l'aérodynamique des éoliennes. Il formule la loi qui porte son nom, selon laquelle l'énergie cinétique du vent

peut être exploitée au maximum à 59,3%. Sa théorie sur le façonnage des ailes est encore appliquée de nos jours.

- **1930** : Développement de petites éoliennes dans les régions rurales des grandes plaines américaines. D'une puissance de 1 à 3 kW, elles permettaient d'éclairer les fermes et de recharger les batteries des radios à cristal. Les éoliennes sont par la suite utilisées pour alimenter des appareils électroménagers et de l'équipement de ferme. Les fermes canadiennes utilisent les éoliennes pour produire de l'électricité et pour pomper l'eau des puits destinée aux auges pour le bétail.
- **Première moitié du XX^e siècle** : Les éoliennes sont confrontées à la concurrence croissante des centrales au charbon et du réseau électrique au niveau national. En raison des pénuries de charbon et de pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne se maintient.
- **1955** : En France à Nogent-le-Roi dans la Beauce, une éolienne expérimentale de 800 kVA fonctionne de 1955 à 1963. Elle avait été conçue par le Bureau d'études scientifiques et techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF.
- **1957** : Johannes Juul crée la turbine Gedser pour la compagnie d'électricité SEAS au Danemark qui sert de modèle aux éoliennes modernes, elle se compose d'un générateur et de trois Pales à pivot.
- **1960** : Ulrich Hutter met au point des plans élaborés de turbines à axe horizontal en Allemagne. Ces turbines sont dotées de pales en fibre de verre et possèdent un angle d'inclinaison ajustable afin d'en augmenter l'efficacité
- **1971** : Premier parc d'éoliennes en mer au large du Danemark d'une puissance totale de 5 MW.
- **1973** : La crise pétrolière ravive l'intérêt pour le grand éolien et incite, les gouvernements de l'Allemagne, de la Suède, du Canada, du Royaume-Uni et des États-Unis à financer des projets de recherche sur les énergies renouvelables. Ces programmes sont à l'origine de la conception et de la mise en œuvre de nouveaux designs d'éoliennes qui réduisent de façon significative le cout de l'énergie éolienne au cours des deux décennies suivantes. Des parcs éoliens sont construits durant les années 1970 aux États-Unis ainsi qu'en Europe.
- **1980** : L'état de Californie décide que d'ici l'an 2000, 10 % de son alimentation énergétique proviendra de l'énergie éolienne et favorise l'installation de 17 000 éoliennes de 20kW à 350 kW entre 1981 et 1990.
- **1984** : Projet Éole, la plus grande éolienne de type Darrieus au monde.

- **2002** : Mise en service du plus grand parc éolien offshore au monde (en 2002) au Danemark (Horns Rev).
- **2004** : La capacité mondiale d'énergie éolienne dépasse les 39 000 MW.
- **2013** : Le Danemark produit 33,2% de son électricité grâce aux éoliennes.
- **2014** : mise en service de l'éolienne V114 de la compagnie danoise Vestas , la plus puissante éolienne au monde , doté d'une capacité de 8MW, d'une hauteur du mat de 140 m et un diamètre de la turbine de 164 m .

1.3.2. Un bref aperçu sur l'énergie éolienne en Algérie [23-25]

Le programme national du développement des énergies renouvelables (EnR), adopté en 2011 puis révisé en 2015, ambitionne d'atteindre, à l'horizon 2030, une puissance totale de 22000 Mégawatts (MW) dédiés à la seule consommation locale. Il prévoit, pour cela, de mettre en œuvre un large éventail de filières technologiques où le photovoltaïque (PV) et l'éolien se taillent la part du lion avec respectivement 13575 MW et 5010 MW, le reste étant réparti entre le thermo-solaire , la biomasse, la cogénération et la géothermie. Suite à la révision du programme national en 2015, la part de l'énergie éolienne a été rehaussée de 2000 MW à 5010 MW et occupe désormais la seconde place derrière le photovoltaïque, loin devant les autres filières. L'importance accordée à l'éolien est certainement due à l'amélioration considérable des coûts moyens du kilowatt/heure (kWh) qui sont, après ceux de la géothermie, les plus bas du renouvelable. L'Energy Information Administration (EIA), prévoit qu'en 2022 les coûts moyens (en \$ de 2015) seront comme suit :

- kWh conventionnel : 0,0726 \$
- kWh géothermique : 0,0423 \$
- kWh éolien : 0,0736 \$
- kWh photovoltaïque : 0,1253 \$
- kWh thermo-solaire : 0,239 \$

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



Figure 1.8 Eolienne de 100 kW de Grand Vent



Figure 1.9 Eolienne d'Adrar

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne est implantée à Adrar (figure 1.9), cette nouvelle centrale de production d'électricité, première du genre à l'échelle nationale, d'une capacité de 10 mégawatts, est implantée sur une superficie de 30 hectares, dans la zone de Kabertène, 72km au nord de la wilaya d'Adrar. Elle est constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune [25].

De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Ce constat était également valable même à l'échelle internationale. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes. L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus performantes et, de plus en plus grandes. Ainsi, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50 kW avec un diamètre de 15 m en 1989 est aujourd'hui de 8 MW, avec un diamètre de 140 m environ (V114). La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 160 mètres.

1.3.3. Les différents types d'éoliennes [19]

On peut classer les éoliennes en deux grandes familles : celles à axe vertical et à axe horizontal. D'autres configurations ont vu le jour, mais n'ont jamais abouti à une industrialisation (profils oscillants, aubes mobiles, profils en translation).

1.3.3.1. Éoliennes à axe vertical

Les principes de ces machines à axe vertical, regroupé sous la technologie VAWT (vertical axis wind turbine) sont connus depuis très longtemps puisqu'elles sont utilisées sur les premières formes de moulin connues. Cette technologie fut lancée de manière semi-industrielle par la firme FloWind pendant le « rush californien » qui produisit 500 unités de 300kW.

Les turbines à axe vertical présentent l'avantage majeur de ne pas être sensibles aux changements de direction du vent, et d'être beaucoup moins perturbées par les turbulences. En revanche, résoudre le problème du frottement mécanique au pied de l'axe y est une vraie gageüre. De plus, ces technologies connaissent des problèmes de rendement ou de « démarrage difficile ». En particulier, tout problème de vibration de ce système en rotation se reporte sur le mât vertical et provoque une fatigue du palier au sol.

Toutefois, avec l'engouement récent pour l'éolien urbain, de nouvelles réalisations de petite puissance sont réapparues sur le marché en essayant de pallier à leurs défauts.

De nombreuses variantes ne sont jamais arrivées à un stade industriel important du fait d'un rendement faible et de nombreux problèmes de fonctionnement, donc toutes ces

machines utilisent l'un (ou parfois une combinaison) des deux principes caractéristiques des VAWT : la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence. Leurs principes de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité.

- *Trainée différentielle*

La mise en mouvement est identique à celle d'un anémomètre. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes comme on peut l'observer sur la Figure 1.10, il en résulte un couple moteur.

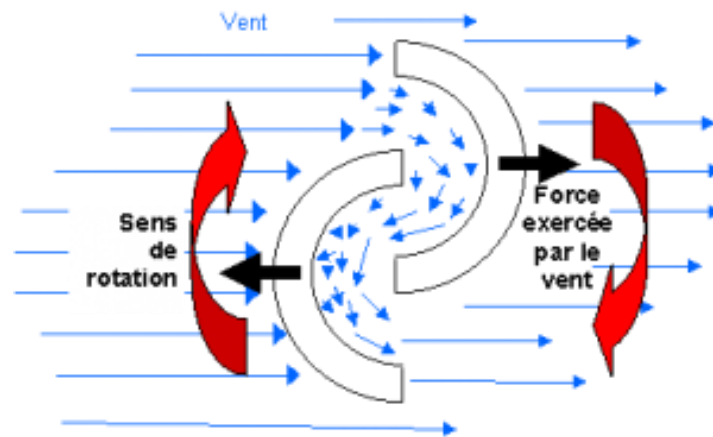


Figure 1.10 Le rotor de Savonius

L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius (Figure 1.10) du nom de son inventeur (1925). Le fonctionnement est ici amélioré. En effet, le vent peut passer entre les deux pales ce qui va permettre une augmentation du couple moteur.

- *Variation cyclique d'incidence*

Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensité et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur d'autant plus important que le bras de levier est grand. Le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pales, cela signifie que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement s'avère donc nécessaire.

Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. Bien que sa première réalisation en soufflerie ait été avec des pales droites, son nom est le plus souvent associé aux machines avec des pales de forme elliptique (figure ci-dessous).

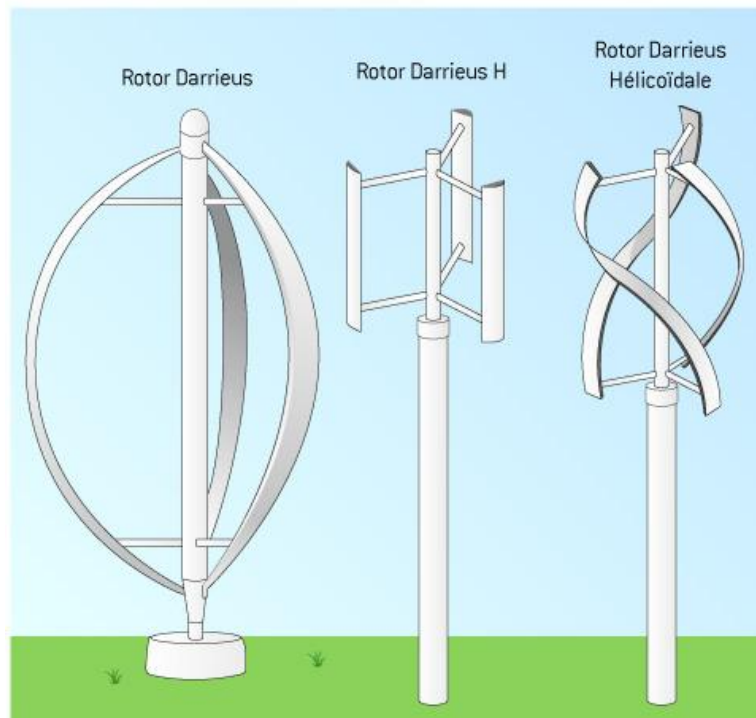


Figure 1.11 Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus.

Pour reprendre les efforts en haut du mât, ce type de machine nécessite des haubans : la surface occupée au sol devient alors très conséquente pour des éoliennes de grande puissance. Les pales utilisées étant très longues et fines (grand allongement), elles sont particulièrement flexibles : il est donc souvent nécessaire de rajouter des bras pour rigidifier l'ensemble. Pour générer un couple important, la partie la plus utile de ces pales est située dans la zone de plus grand diamètre : il s'avère donc qu'il n'est pas nécessaire de conserver cette forme elliptique.

D'autres types de machines ont ainsi été développés en utilisant des pales droites, offrant une plus grande surface utile, car formant en rotation soit un cylindre (Darrieus type H) soit un tronc de cône de révolution de grand diamètre.

Les plus récentes réalisations utilisent des pales s'enroulant sur une forme cylindrique ou elliptique. Ces pales ne rejoignant ni la base ni l'extrémité du mât vertical, des bras sont nécessaires pour porter et rigidifier le rotor. La Figure (1.11) résume l'ensemble des

différentes formes d'éoliennes pouvant être conçues en utilisant le principe de fonctionnement de Darrieus.

1.3.2.2. Machines à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent. Deux types de configuration sont regroupés sous la terminologie HAWT (horizontal axis wind turbine) : les éoliennes « amont » et les éoliennes « aval ». Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients.

Le principal intérêt de la formule « aval » est que la machine peut s'orienter naturellement en lacet (autour de l'axe vertical de la tour). En effet, en inclinant les pales vers l'arrière, elles forment en rotation un cône : la surface latérale virtuelle ainsi créée fait alors office de gouvernail. Par ailleurs, dans la configuration aval, la tour perturbe fortement l'écoulement de l'air (effet dit de masque) : les pales, qui passent dans ce sillage, subissent à chaque tour des efforts répétés, source de vibrations et de fatigue. On doit alors modifier l'attache des pales au sein du moyeu pour que le rotor se comporte dans son ensemble comme un balancier et absorbe ces perturbations.

La formule « amont » ne nécessite pas d'adaptation du moyeu, l'écoulement de l'air au niveau des pales est plus aisé et n'est pas perturbé par la tour. Cependant les pales subissent la poussée axiale engendrée par le vent. De plus, le rotor peut être animé de mouvement de battement, c'est pourquoi il convient d'utiliser des pales très rigides (voire avec une prédéformation dès la conception) pour limiter leur flexion et éviter toute collision avec la tour. Une éolienne « amont » n'est pas stable naturellement et doit être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. Pour les petites machines le gouvernail est la solution la plus simple. Pour les machines de plus grandes puissances, l'orientation est pilotée. On constate néanmoins que la quasi-totalité des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont » .

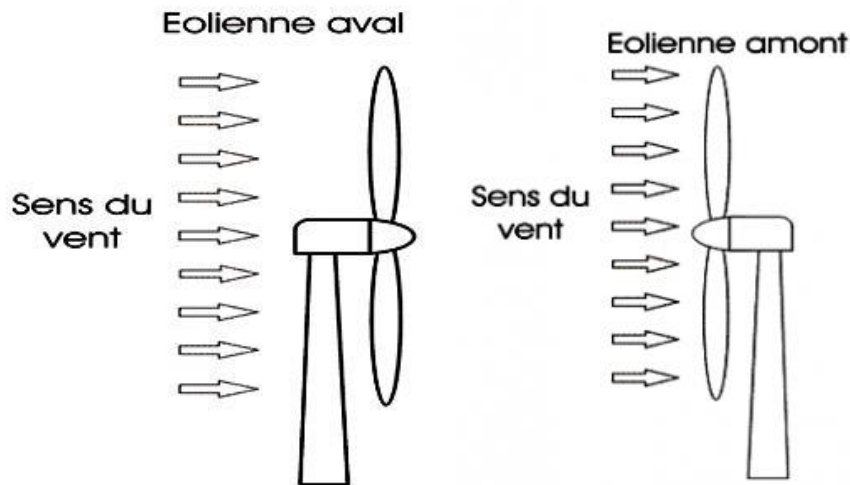


Figure 1.12 Les types d'éoliennes à axe horizontal

1.3.4. Le développement des machines de grande puissance [20-21]

Pour synthétiser le développement des éoliennes, il faut voir l'évolution du diamètre en fonction de la puissance et de l'année d'arrivée des prototypes. A partir de 1989, la puissance des machines augmente d'environ 50 %, tous les 2 à 3 ans. La puissance moyenne unitaire des éoliennes installées était déjà supérieure au MW en Allemagne à partir de l'an 2000 et au niveau mondial en 2003. Cette tendance s'est cependant arrêtée avec les prototypes (tous allemands) de la classe 5 MW : l'E112 d'Enercon (4,5MW en 2002), les 5M et M5000 de Repower et Multibrud (5 MW en 2004) et enfin la Bard VM (5 MW) et l'E126 d'Enercon (6 MW) en 2007 qui sont tous testés depuis sur des sites terrestres près des côtes d'Allemagne du nord.

Une question qui vient à l'esprit « Pourquoi un tel arrêt dans l'augmentation de la puissance? », simplement parce qu'avec les dimensions de ces machines géantes, on a atteint, dans beaucoup de domaines, les limites de ce que l'on sait concevoir, fabriquer, transporter et installer actuellement, tant d'un point de vue architecture machine que sous-systèmes. Il est à ce titre intéressant par exemple d'analyser l'évolution de la masse placée en haut du mât (figure 1.13), c'est-à-dire de l'ensemble des éléments de la nacelle et du rotor :

– si l'on avait poursuivi le développement de la puissance avec les technologies du début des années 1990, on aurait atteint les 400 tonnes en tête-rotor avec des machines de l'ordre de 80 m de diamètre (courbe appelée « tendance 1990 »),

– si l'on avait poursuivi le développement de la puissance avec les technologies du milieu des années 1990, on aurait atteint les 400 tonnes en tête-rotor avec des machines de l'ordre de 100 m de diamètre (courbe appelée « tendance 1995 »).

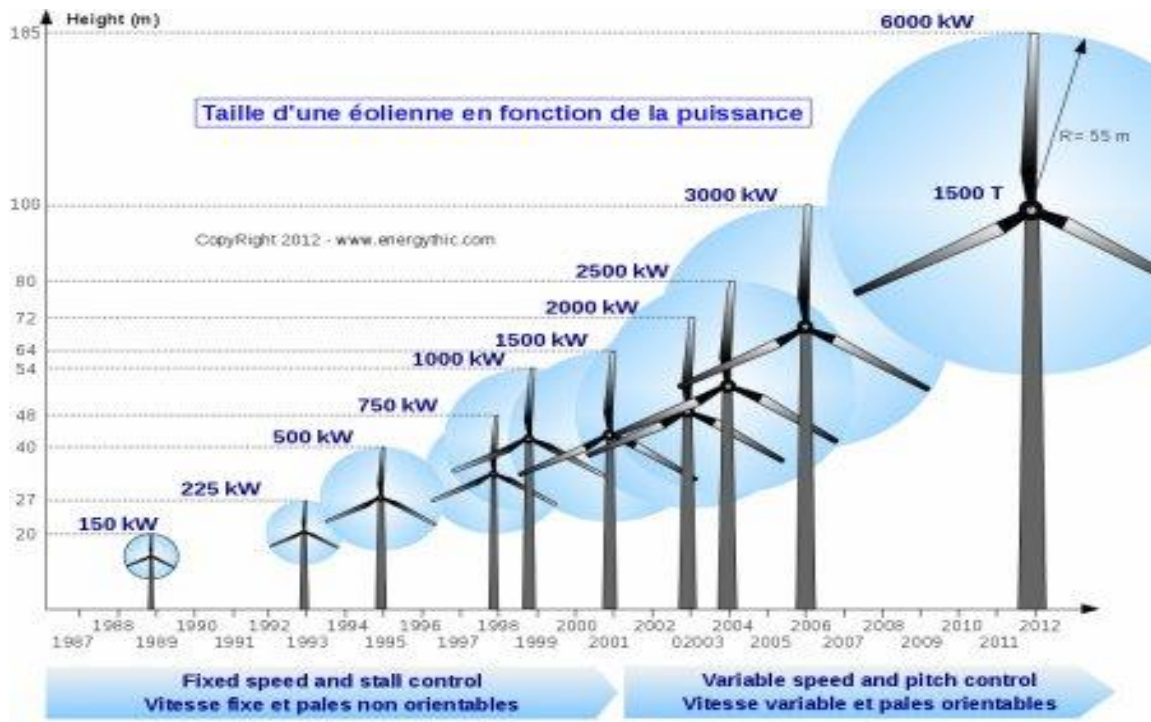


Figure 1.13 Représentation schématique de l'évolution des prototypes, proposés par la suite sur le marché, en fonction de leurs puissances, diamètre et masse de l'ensemble nacelle/rotor.

1.3.5. Applications des éoliennes

Environ 2,5% des besoins énergétiques mondiaux sont couverts par l'énergie éolienne. L'ensemble des capacités installées dans le monde s'élevait fin 2013 à environ 318 GW. Les plus grands marchés se trouvent en Chine (91,4 GW), aux États-Unis (61 GW) et en Allemagne (34,2 GW). En Allemagne, l'énergie éolienne a pris part à hauteur de 7,9% à la production totale d'électricité en 2013.

Les trois technologies d'exploitation de l'énergie éolienne sont présentées en détail ci-dessous :

Éolien terrestre

De nos jours, les installations éoliennes terrestres sont souvent construites sur les côtes, ou à proximité des côtes. Afin d'obtenir des rendements élevés, on a conçu des turbines placées sur de hautes tours et munies de rotors balayant des surfaces importantes. Les lieux

au sommet des montagnes ou sur les plateaux sont particulièrement adaptés à l'exploitation de l'énergie éolienne.

Éolien offshore

Dans le long terme, leur meilleur facteur d'utilisation, grâce à la vitesse du vent constamment plus élevée en mer, permet aux parcs éoliens offshore de remplacer partiellement les centrales électriques conventionnelles. Les rendements énergétiques attendus peuvent excéder de jusqu'à 100% ceux des installations terrestres.

Petit éolien

Les petites installations éoliennes, ou petits aérogénérateurs, sont particulièrement adaptées à l'auto-alimentation en électricité ou à la production d'électricité décentralisée dans l'espace rural.

1.3.6. Avantages et inconvénients de l'électricité générée par le vent

- ✓ Une ressource renouvelable non polluante

L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres). En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

- ✓ Questions du coût

Même si le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication, la technologie nécessite un investissement initial plus élevé que les générateurs à combustible fossile.

- ✓ Préoccupations environnementales

- Bien que les fermes d'énergies éoliennes sont relativement peu d'impact sur l'environnement par rapport aux centrales à combustible fossile (Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations), il y a une certaine inquiétude sur le bruit produit par les pales du rotor ainsi que l'effets sur le paysage (esthétique).

- ✓ Approvisionnement et questions Transport

L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.

1.4. Conclusion

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis, éventuellement, en énergie électrique. Dans ce chapitre, un état de l'art sur les énergies a été présenté. L'accent a été mis sur l'énergie éolienne qui est le thème de cette thèse de doctorat. Après un historique sur les éoliennes, les différents types d'éoliennes, suivis par l'étude des différents d'applications des éoliennes ont été détaillés. Le chapitre est conclu par une brève présentation des avantages et inconvénients des éoliennes.

1.5. Bibliographie

- [1] BOURDOUKAN, Paul. *Etude numérique et expérimentale destinée à l'exploitation des techniques de rafraîchissement par dessiccation avec régénération par énergie solaire*. 2008. Thèse de doctorat. La Rochelle.
- [2] DELYANNIS, E. et BELESSIOTIS, V. Solar energy and desalination. *Advances in solar energy*, 2001, vol. 14, p. 287-330.
- [3] GUTIERREZ-SILVA, Claudia, LABOUREL, Florian, et YALCIN, Deniz. *Solar in Life: l'énergie solaire dans le monde du vivant*. 2015. Thèse de doctorat. INSA Lyon.
- [4] MEKHILEF, S., SAIDUR, R., et SAFARI, A. A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no 4, p. 1777-1790.
- [5] BLANC, Philippe. *Énergie solaire et observation de la terre*. 2015. Thèse de doctorat. Mines ParisTech; Université Grenoble Alpes.
- [6] LABOURET, Anne et VILLOZ, Michel. *Énergie solaire photovoltaïque-4ème édition*. Dunod, 2009.
- [7] Labouret A. & Viloz M., *Énergie solaire photovoltaïque*, Dunod, Paris 2003,
- [8] GREEN, Martin A. *Solar cells: operating principles, technology, and system applications*, Longman Higher Education 1982.

- [9] GRÄTZEL, Michael. *Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells*. *Inorganic chemistry*, 2005, vol. 44, no 20, p. 6841-6851.
- [10] BUBE, Richard. *Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion*. Elsevier, 2012.
- [11] BOCHU, Jean-Luc. *Energies et agriculture: de la maîtrise de l'énergie aux énergies renouvelables*. Educagri Editions, 2003.
- [12] SAFA, Henri. *La situation énergétique en France et dans le monde*. EDP Sciences, 2012.
- [13] <http://www.energies-renouvelables.org/> (l'Observatoire des énergies renouvelables)
- [14] <https://www.edf.fr/>
- [15] Pierre Crausse & François Vieillefosse, *De l'eau à la lumière, un siècle d'énergie hydroélectrique en France*, Toulouse, Nouvelles Éditions Loubatières, 2011,
- [16] BURTON, Tony, SHARPE, David, JENKINS, Nick, *et al.* *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, 2001.
- [17] NELSON, Vaughn. *Wind energy: renewable energy and the environment*. CRC press, 2013.
- [18] SØRENSEN, John Dalsgaard et SØRENSEN, Jens N. (ed.). *Wind energy systems: Optimising design and construction for safe and reliable operation*. Elsevier, 2010.
- [19] LECONTE, Philippe, RAPIN, Marc, et SZECHENYI, Edmond. Éoliennes. *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique*, 2001, no BM4640, p. BM4640. 1-BM4640.
- [20] RAPIN, Marc et NOËL, Jean-Marc. *Énergie éolienne-2e éd.: Du petit éolien à l'éolien off shore*. Dunod, 2014.
- [21] FOX, Brendan. *Énergie Eolienne et Intégration au réseau*. Dunod, 2009.
- [22] <http://www.renewables-made-in-germany.com/fr/renewables-made-in-germany/technologies/energie-eolienne/energie-eolienne/technologies-et-applications.html> « Agence d'Allemagne d'énergie »
- [23] GUERRI, O. L'énergie éolienne en Algérie: un bref aperçu. *Bulletin des Energies Renouvelables*, 2011, no 21.
- [24] <http://portail.cder.dz/spip.php?article5751> /www.sonelgaz.dz

- [25] MERZOUK, N. Kasbadji. *Evaluation du Gisement Energétique Eolien- Contribution à la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie*. 2006. Thèse de doctorat. Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.

Chapitre 2

Modélisation d'une éolienne à vitesse variable

Sommaire

2.1.	Introduction	29
2.2.	Conception d'une éolienne	29
2.3.	Classification des éoliennes.....	31
2.3.1.	Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé	31
2.3.2.	Classification des éoliennes suivant la vitesse de rotation.....	32
2.3.2.1.	Eolienne à vitesse fixe	32
2.3.2.2.	Éolienne à vitesse variable.....	33
2.4.	Modélisation d'une éolienne à vitesse variable.....	33
2.4.1.	Modélisation du vent.....	34
2.4.2.	Modèle aérodynamique	35
2.4.2.1.	Aérodynamique de la pale	35
2.4.2.2.	Aérodynamique du rotor.....	36
2.4.3.	Modèle du multiplicateur	39
2.4.4.	Modélisation de la turbine.....	40
2.4.5.	Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents / générateurs	41
2.5.	Conclusion.....	46
2.6.	Bibliographie	46

Chapitre 2

Modélisation d'une éolienne à vitesse variable

2.1. Introduction

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique, qui est le plus souvent transformée en énergie électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage, dont un type particulier est l'éolienne bollée. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique tout en assurant un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique.

Dans la première partie de ce chapitre, on va étudier la conception d'une éolienne, son principe de fonctionnement ainsi que son modèle mathématique associé.

La deuxième partie est consacrée à l'étude en détail du modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent vu ses avantages incontestés dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

2.2. Conception d'une éolienne

Aujourd'hui, la conception la plus courante de l'éolienne, et l'éolienne à axe horizontal (HAWT). Autrement dit, l'axe de rotation est parallèle au sol. Les principaux sous-systèmes d'une éolienne à axe horizontal sont présentés dans la Figure (2.1) et est constituée des éléments principaux suivants [1-5]:

- **Le rotor** : est en tout premier lieu une structure tournante soumise à différentes sollicitations d'origine aérodynamique, inertielle (gravité, force centrifuge, efforts gyroscopiques) ou élastique (déformations). Il est composé des pales et du moyeu.

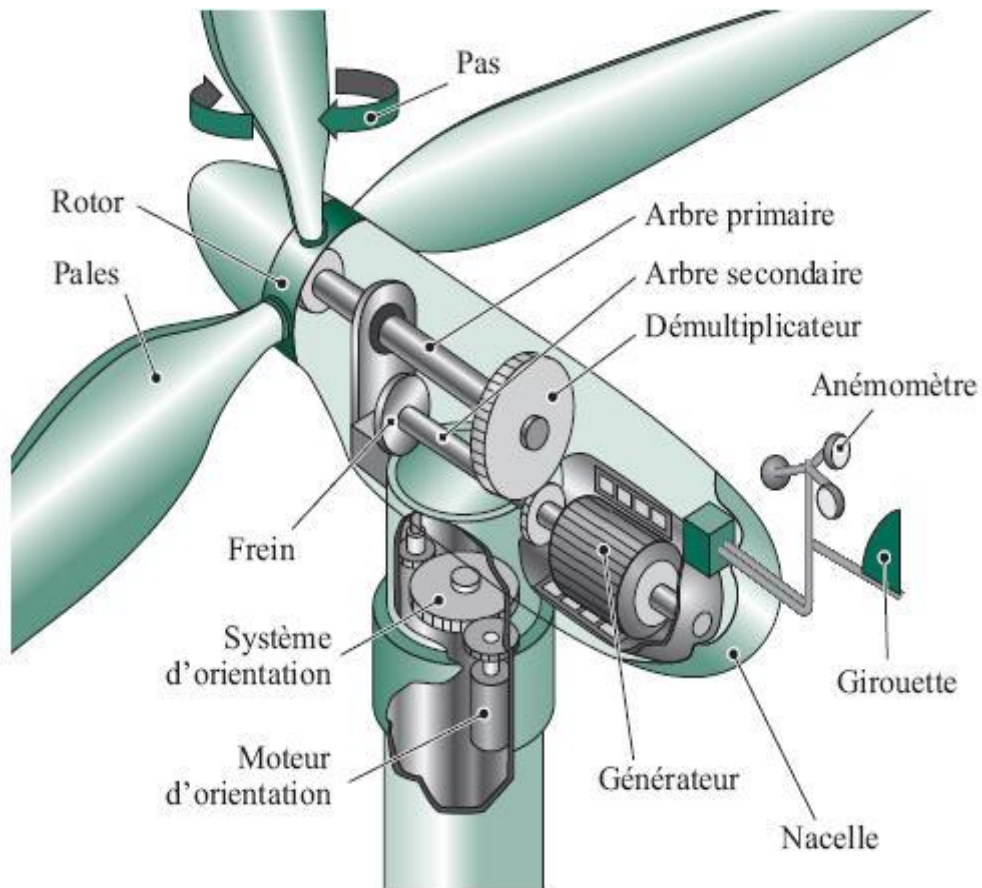


Figure 2.1 Composition d'une éolienne

- **Le système du verrouillage du rotor** : le frein aérodynamique est réalisé à l'aide de trois pales commandées indépendamment et de manière redondante et pouvant pivoter de 90° autour de leur axe longitudinal, il s'active quand la vitesse du vent est supérieure à 90km/h et donc empêchent ainsi le rotor de fonctionner.
- **L'arbre principal** : il est entraîné par les pales et tourne à vitesse assez basse avec beaucoup de force.
- **L'arbre rapide** : l'arbre rapide est relié en sortie du multiplicateur, il fait la liaison entre le multiplicateur et la génératrice. Sa rotation est donc beaucoup plus rapide (environ 1500tr/min), mais sa force est bien plus faible.
- **Le multiplicateur** : il augmente la vitesse de rotation au niveau nécessaire pour la génératrice.

- **Le système de refroidissement** : consiste en un circuit huile / air à capacité de refroidissement graduelle. Les roulements et denture d'engrenage sont constamment lubrifiés par de l'huile refroidie. L'huile du multiplicateur assure non seulement la lubrification mais aussi le refroidissement. La température des roulements et de l'huile est surveillée en permanence.
- **La génératrice** : c'est elle qui permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est soit directement sur l'axe de l'aéromoteur soit entraînée par un multiplicateur.
- **L'anémomètre** : Cet instrument sert à connaître la vitesse du vent. Il se situe derrière les pales. Il mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h).
- **La girouette** : Elle sert à savoir la direction du vent.

2.3. Classification des éoliennes

2.3.1. Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé [6]

Selon la puissance visée et le type d'utilisation recherchée, les paramètres de conception de départ seront différents. On conçoit aisément que la définition d'un petit aérogénérateur pour particulier ou d'une machine multi-mégawatt ne se fait pas avec les mêmes critères. Pour une machine de grande taille à pas variable, on pourrait envisager de démarrer la rotation en s'aidant du générateur utilisé en moteur. Par contre, pour une petite éolienne régulée au décrochage, le vrillage, notamment au pied de la pale, devra permettre un démarrage autonome de la machine.

Les éléments qui déterminent la puissance de sortie d'une éolienne sont :

- la vitesse du vent ;
- le diamètre du rotor ;
- la masse de l'air ;
- le nombre et la forme de pales ;
- le rendement mécanique du rotor vers l'axe de la génératrice ;
- le rendement électrique de la génératrice ;

Le tableau 2.1 résume la classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.

Dénomination	Diamètre du rotor [m]	Aire balayée [m ²]	Puissance [kW]	Application
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.04-0.25	en général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés
Mini	1.25-3	1.2-7.1	0.25-1.4	essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau
Domestique	3-10	7-79	1.4-16	elles balayent un spectre assez large allant de rotors de 3 à 10 m de diamètre. C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers
Petite commerciale	10-20	79-314	25-100	elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	100-1000	elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens
Grande commerciale	50-100	1963-7854	1000-3000	elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens

Tableau 2.1 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.

2.3.2. Classification des éoliennes suivant la vitesse de rotation

2.3.2.1. Eolienne à vitesse fixe [5][7-8]

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premiers modèles utilisés pour produire l'électricité, ils utilisent des générateurs asynchrones et elles sont connectées directement au réseau électrique. Ces machines sont entraînées par un multiplicateur et leurs vitesse est maintenues approximativement (variation de 1-2%) constante, par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). L'absence du dispositif d'électronique de puissance rend ce type d'éolienne simple. Les systèmes d'éoliennes les plus utilisés dans ce cas sont illustrés à la figure (2.2).

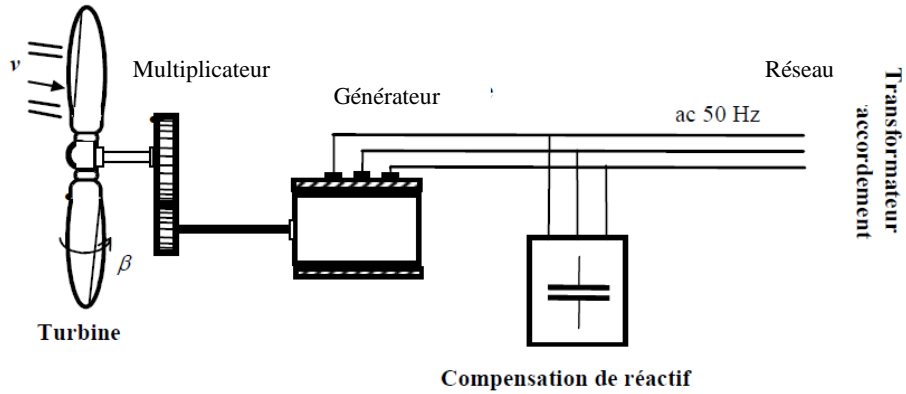


Figure 2.2 Eolienne à vitesse fixe [8]

2.3.2.2.Éolienne à vitesse variable [5][7-8]:

Les éolienne à vitesse variable sont les modèles les plus utilisés pour produire l'électricité, l'avantage de ce type de modèle est le découplage entre le générateur et le réseau électrique par une interface d'électronique de puissance ; c'est cette dernière qui offre la possibilité de fonctionnement à vitesse variable pour ce type d'éolienne. Par rapport aux éoliennes à vitesse fixe, qui atteignent le rendement maximale pour une seule vitesse du vent, les éoliennes à vitesse variable sont conçues pour atteindre le rendement maximal pour une large plage de vitesse du vent.

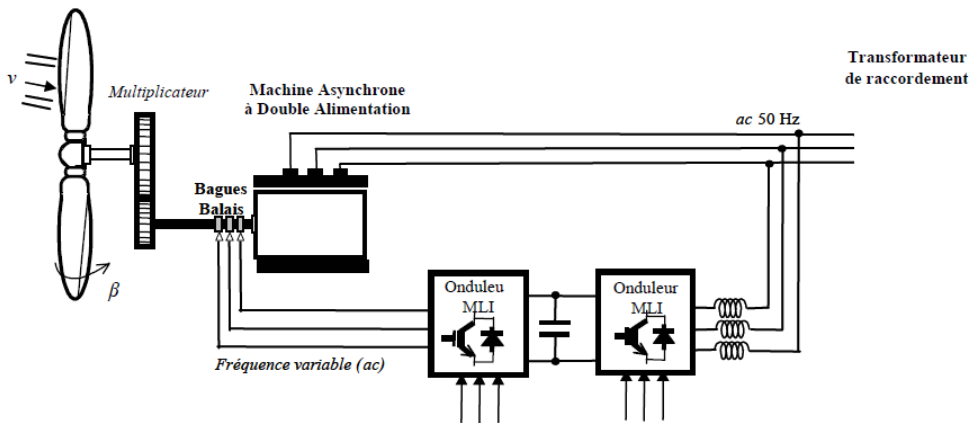


Figure 2.3 Eolienne à vitesse variable [8]

2.4. Modélisation d'une éolienne à vitesse variable

Le modèle de l'éolienne étudié dans ce mémoire est le modèle à une masse [9-11], constitué d'une turbine éolienne comprenant trois (3) pales de longueur R à axe horizontal, à vitesse variables et régulation pitch entraînant une génératrice synchrone à aimants

permanents GSAP à travers un multiplicateur de vitesse de gain G comme il est représenté sur la figure 2.4.

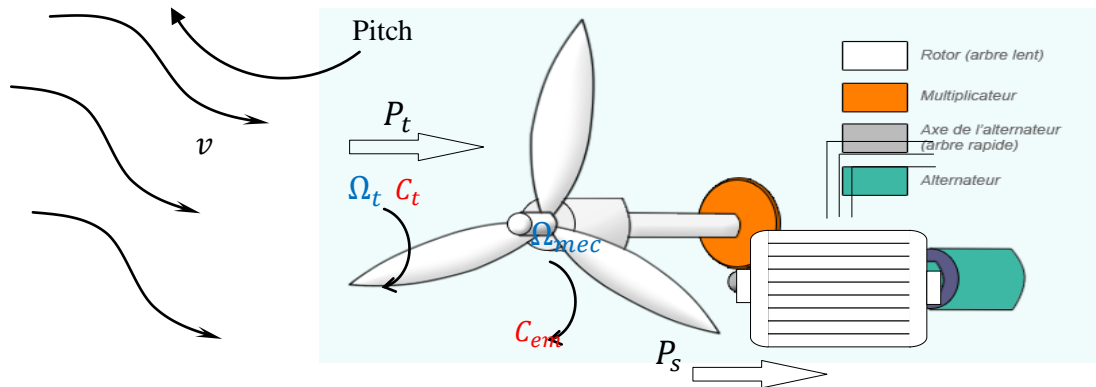


Figure 2.4 Schéma de la turbine éolienne.

2.4.1. Modélisation du vent

La vitesse du vent est l'une des variables les plus importantes dans la modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne et, c'est la principale variable d'entrée dans le diagramme chaîne synoptiques. Par conséquent, la précision de la simulation dépend de la représentation de la vitesse du vent. Malheureusement, le vent a un comportement aléatoire induisant un caractère fluctuant. Ainsi, afin de reproduire avec précision le comportement dynamique de la vitesse du vent, deux approches peuvent nous aider. La première consiste à considérer des mesures de longue durée sur un site de vent réel et la seconde consiste à représenter la caractéristique du vent par un modèle analytique. La première solution est évidemment plus précise. Néanmoins, elle ne permet pas facilement de simuler différents types de configurations de sites de vent. Dans notre mémoire, on s'intéresse au deuxième cas et plus précisément à la caractéristique spectrale de Van Der Hoven [12-14] qui est la plus répandue. La vitesse du vent en un point peut être décomposée en une composante variant lentement, et des fluctuations :

$$V = V_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$$

avec : V_0 la composante moyenne

A_i Amplitude de chaque composante spectrale fluctuante

ω_i Pulsation de chaque composante spectrale fluctuante

φ_i Déphasage de chaque composante spectrale fluctuante

La figure (2.5) représente le modélisation du vent sous matlab/simulink ainsi qu'un profil du vent à partir de la caractéristique de Van Der Hoven.

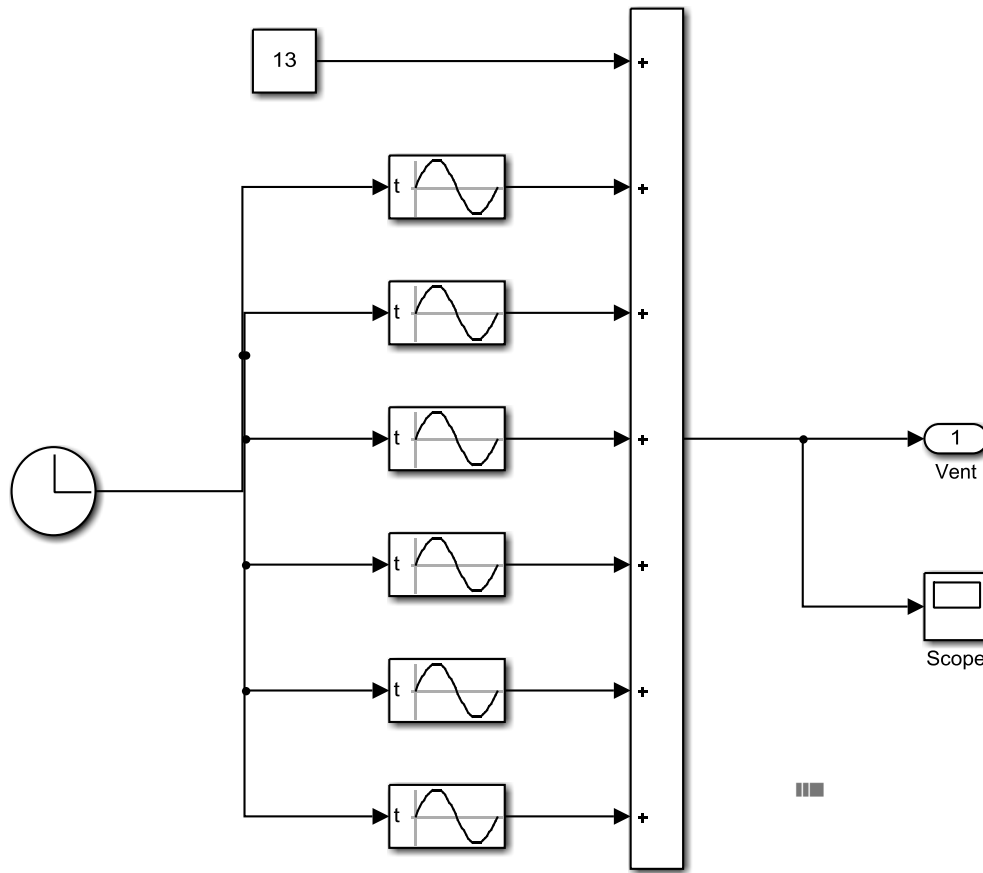


Figure 2.5 Schéma bloc du vent sous matlab/simulink

2.4.2. Modèle aérodynamique

2.4.2.1. Aérodynamique de la pale

Les pales sont les éléments les plus représentatifs de l'éolienne. Ce sont aussi les seuls éléments en mouvement. Elles constituent le point d'entrée de l'énergie apportée par le vent. Leur concept fait appel à une diversité impressionnante de principes, de formes et de matières. Car, si les pales d'hier étaient de simples rames à air, celles d'aujourd'hui sont devenues des ailes sculptées dont les lignes sont aussi travaillées que celles du monde de l'aviation [15].

Pour de très faibles conditions de vent, le rotor de l'éolienne est à l'arrêt. Il n'y a donc pas de composante de rotation vue par le profil, mais uniquement la vitesse du vent. Pour démarrer le rotor, il faut donc soit utiliser la connexion au réseau pour le mettre en rotation,

soit, dans le cas où la machine est autonome, pouvoir générer \vec{F}_c et donc un couple uniquement avec \vec{V}_v [2][3].

On utilise pour cela les sections pied de pale que l'on positionne de façon adéquate à l'aide d'un angle d'inclinaison β . En obtenant ainsi des angles d'incidence α vus par les profils pouvant générer une résultante \vec{F}_r favorable, la pale est susceptible de se mettre en rotation. Avec la mise en rotation, la composante $\vec{\Omega}_t$ (vitesse de rotation de la turbine) va apparaître : la vitesse résultante va se modifier et réduire l'incidence jusqu'à stabilisation de la vitesse de rotation.

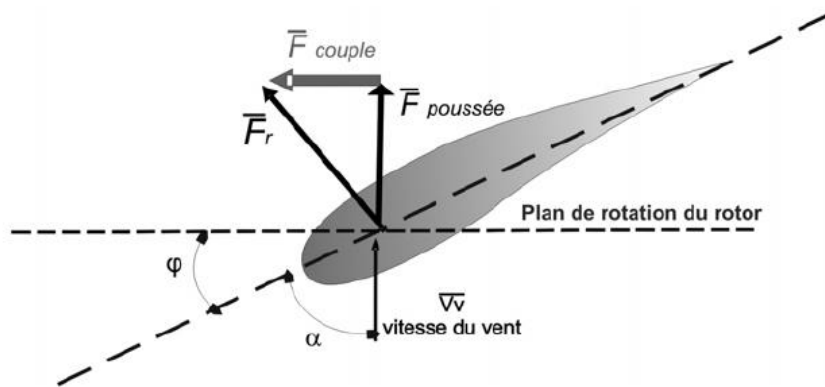


Figure 2.6 Calage des sections pied de pale [3]

2.4.2.2. Aérodynamique du rotor

La théorie fondamentale de la conception et le fonctionnement des éoliennes est obtenue sur la base des lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie dans un flux de vent pour évaluer les performances d'un rotor.

L'écoulement amont est supposé uniforme de vitesse v_0 . Dans le cas d'une éolienne, le flux d'air traversant le disque rotor de surface S est ralenti et lui fournit de l'énergie (voir la figure 2.7). On a donc naturellement :

$$v_0 > v > v_2$$

La loi de conservation de la quantité de mouvement donne les égalités suivantes [16-20]:

$$S_0 v_0 = S v = S_2 v_2$$

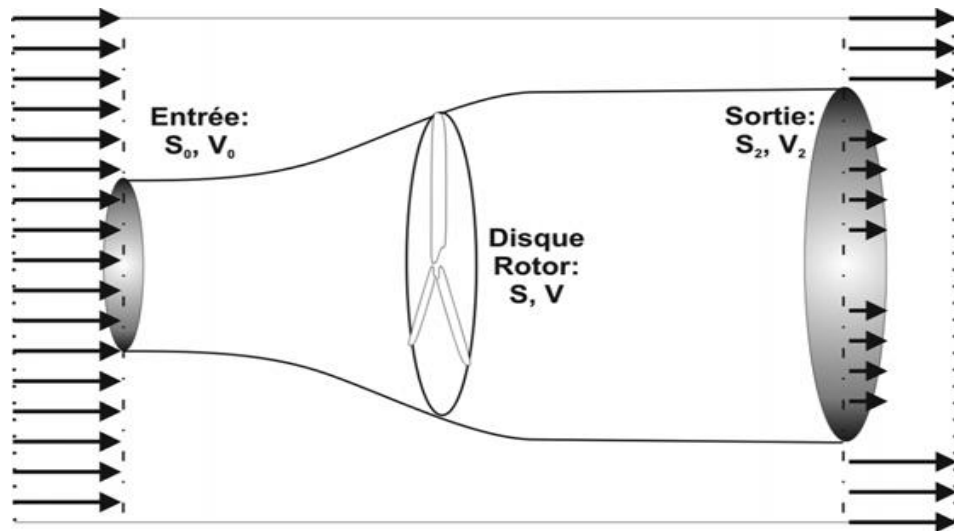


Figure 2.7 Représentation du tube de courant[16]

En notant ρ la masse volumique de l'air (en kg.m^3), $S = \pi R^2$ l'aire de la surface balayée par le rotor et R le rayon des pales de l'éolienne. La puissance absorbée par le rotor s'exprime sous la forme suivante :

$$P = \rho S v^2 (v_0 - v_2) \quad (2.1)$$

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

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S v (v_0^2 - v_2^2) \quad (2.2)$$

En effectuant le bilan énergétique, l'égalité des expressions (2.1) et (2.2) donne :

$$v = \frac{v_0 + v_2}{2} \quad (2.3)$$

L'étude de la variation de la puissance en fonction de la vitesse à l'aval, $\frac{dP}{dv_2}$ fournit une

seule racine ayant un sens physique : $v_2 = \frac{v_0}{3}$, correspondant au maximum de puissance.

En définissant le coefficient de puissance : $C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S v_0^3}$, on aboutit à la limite

$C_{p_{MAX}} = \frac{16}{27} \approx 0.593$ qui représente la fraction maximale de l'énergie passant dans le tube

de courant théoriquement récupérable. Elle a été établie en 1920 par Albert Betz, appelé « limite de Betz » il montre avec cette limite que la puissance récupérée ne peut pas dépasser les 59% de la puissance cinétique du vent.

Ce coefficient de puissance permet de classer les différents types d'éoliennes suivant leur nature (figure 2.8) en fonction du rapport de la vitesse spécifique de la turbine donné par l'équation suivante:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{v} \tag{2.4}$$

Ω_t : est la vitesse de rotation disponible sur l'axe de la turbine (rad / s)

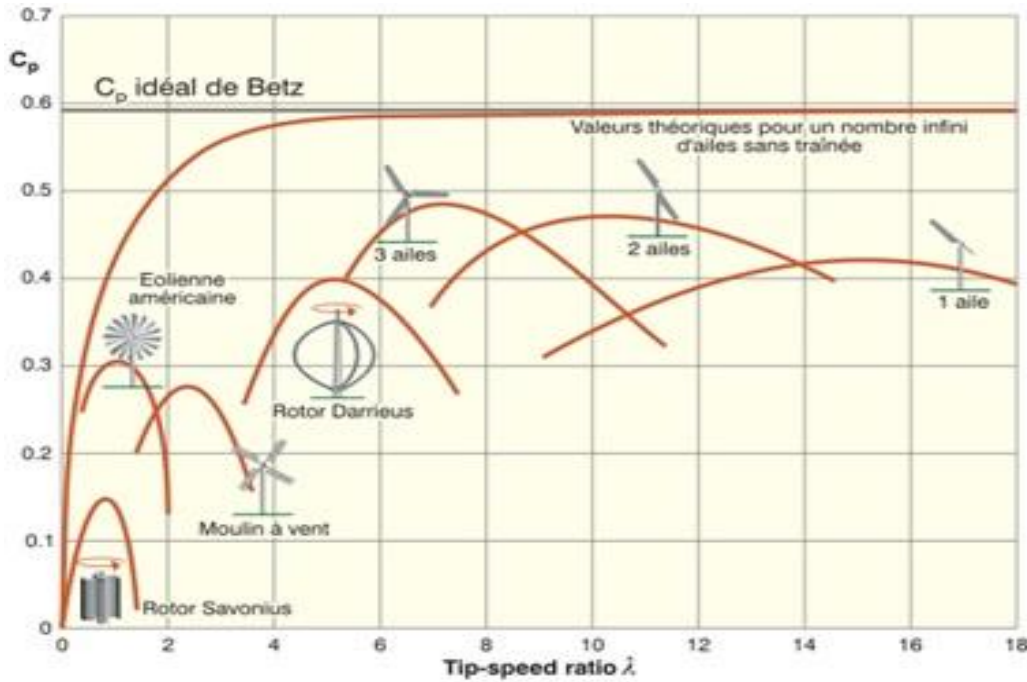


Figure 2.8 Évolution typique du rendement aérodynamique en fonction du tip-speed ratio et du modèle d'éolienne.

En utilisant le coefficient de puissance ; la puissance aérodynamique devienne :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p v^3 \tag{2.5}$$

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques. Il représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine.

L'expression de C_p dépend du rapport de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'inclinaison des pales β . Elle est donnée sous la forme suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3\beta - c_4 \right) \cdot e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + c_6\lambda \tag{2.6}$$

Où : β_i exprimé en degrés.

$$c_1 = 0.5109 ; c_2 = 116 ; c_3 = 0.4 ; c_4 = 5 ; c_5 = 21 ; c_6 = 0.0068 ;$$

La figure (2.9) illustre les courbes de $C_p(\lambda, \beta)$ pour plusieurs valeurs de β (deg) obtenues par la relation précédente :

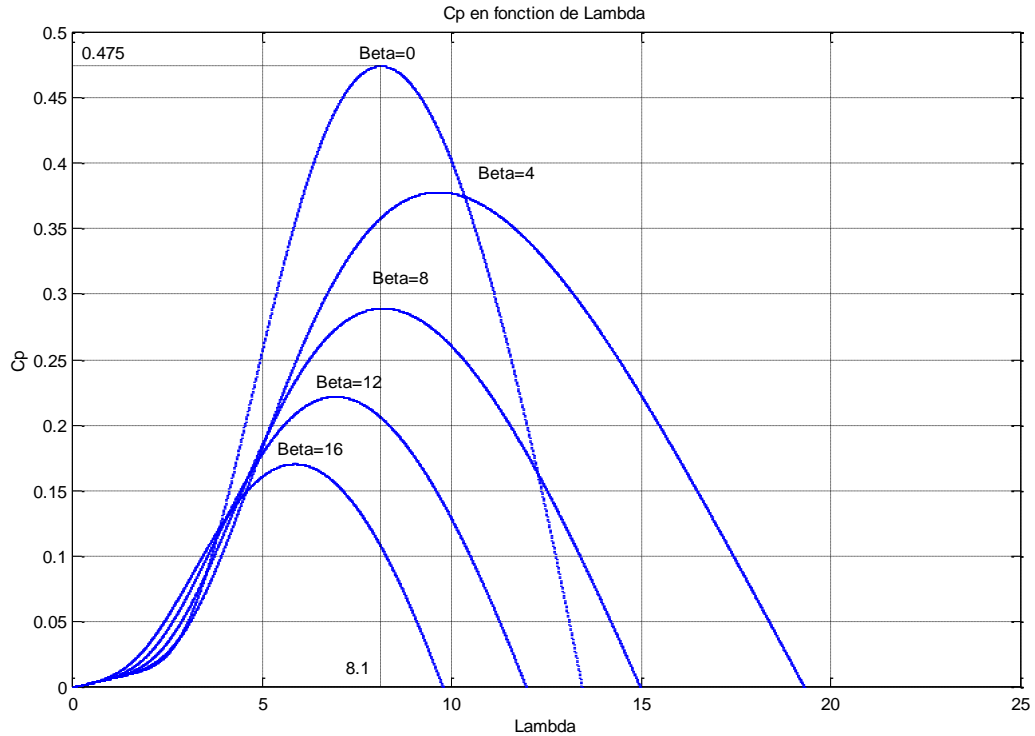


Figure 2.9 Évolution du rendement aérodynamique en fonction de l'angle d'inclinaison des pales.

Sur cette figure on peut voir que pour chaque valeur de l'angle β on obtient un coefficient de puissance, mais ce coefficient est maximum pour $\beta = 0$ qui correspond à une vitesse de vent faible ($v < 12\text{m/s}$), et chaque fois la vitesse du vent augmente au-delà de la vitesse nominale, l'angle β augmente jusqu'à l'arrêt complet de l'éolienne.

Le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_t = \frac{P_a}{\Omega_t} \quad (2.7)$$

2.4.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice, avec un gain G ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_{mec} \quad (2.8)$$

$$C_t = \frac{1}{G} C_{mec} \quad (2.9)$$

Ω_t , est la vitesse de rotation disponible sur l'axe de la turbine (rad / s)

2.4.4. Modélisation de la turbine

Le modèle mathématique de la turbine est donné par :

$$J\dot{\Omega}_{mec} = C_{mec} - C_{em} - C_{visc} \quad (2.10)$$

Où :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.11)$$

J : L'inertie totale, J_g : inertie de la génératrice et $J_{turbine}$ inertie de la turbine.

$$C_{visc} = f\Omega_{mec} \quad (2.12)$$

C_{visc} : Le couple résistant dû aux frottements ($N.m$) et f : est le coefficient de frottement visqueux.

Ω_{mec} , est la vitesse de rotation mécanique disponible sur l'axe du générateur (rad / s).

C_{em} , est le couple électromagnétique disponible sur l'axe du générateur ($N.m$).son équation est donnée sur la partie électrique (équation 2.17)

C_{mec} , est le couple mécanique disponible sur l'axe générateur ($N.m$), il est donné par la relation suivante :

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t = \frac{1}{G} \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{G} \frac{0.5C_p \rho \pi R^2 v^3}{\Omega_t} \quad (2.13)$$

Où :

C_t , est le couple mécanique disponible sur l'axe de la turbine ($N.m$).

Selon (2.4), (2.8), (2.10), (2.12), (2.13), le modèle mathématique de la partie mécanique de l'éolienne devient :

$$\dot{\Omega}_{mec} = -\frac{f}{J} \Omega_{mec} + \frac{0.5\rho\pi R^5 C_p}{JG^3 \lambda^3} \Omega_{mec}^2 - \frac{1}{J} C_{em} \quad (2.14)$$

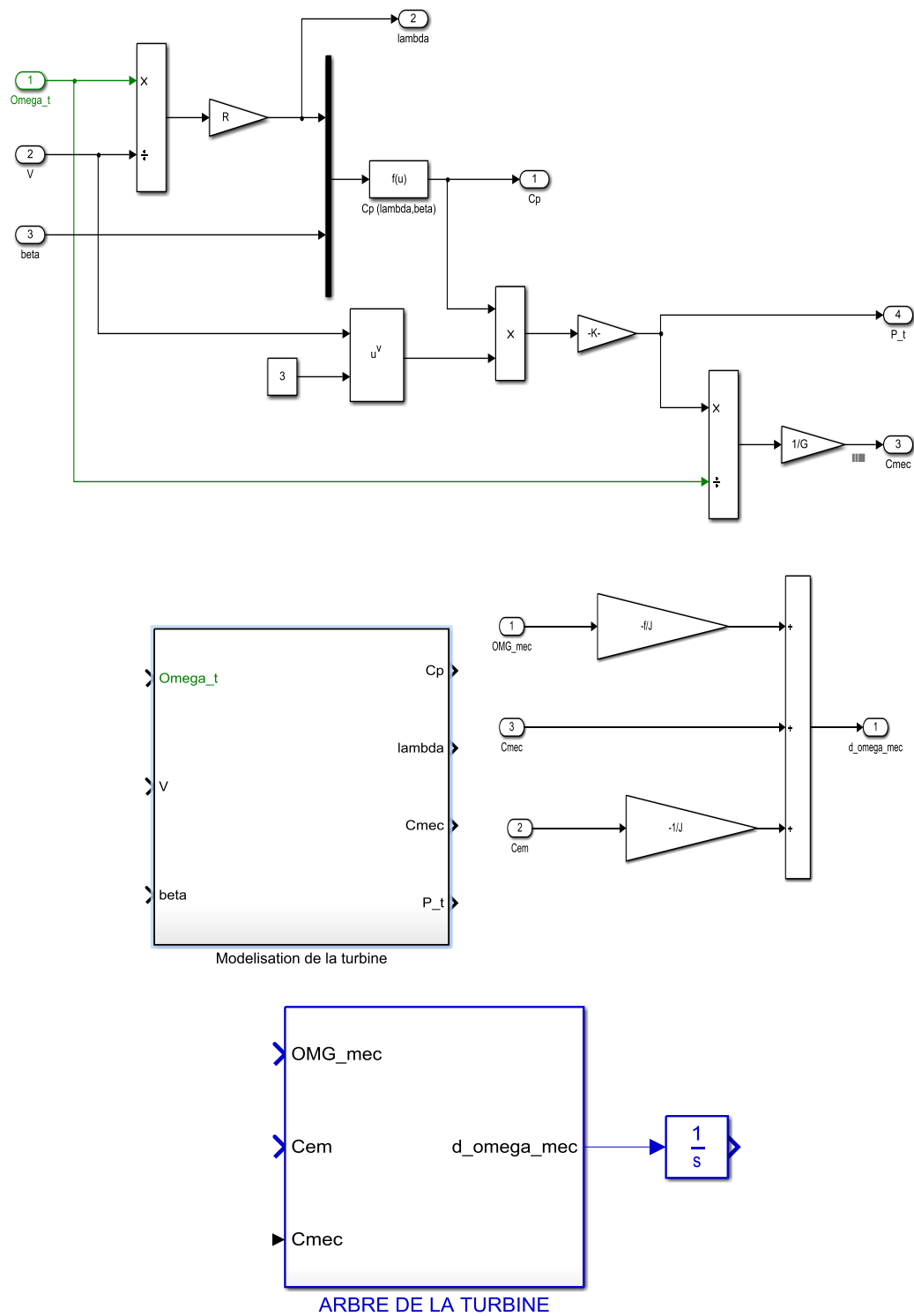


Figure 2.10 Schémas blocs de la partie mécanique de l'éolienne sous matlab/simulink

2.4.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents / générateurs

La machine synchrone à aimants permanents / génératrice (GSAP) joue un rôle clé dans les systèmes de production d'énergie éolienne à entraînement direct pour transformer l'énergie

mécanique en énergie électrique [21-30]. Parmi les avantages de l'application de la GSAP ont peut citer :

- Gain important en poids (pas de multiplicateur)
- Réduction du nombre de pièces en rotation
 - Moins de bruit
 - Réduction de la charge
 - Augmentation de la durée de vie de la machine
 - Diminution de la maintenance
- Coûts de maintenance relativement faibles
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement en survitesse.
- Les aimants moins chers que les bobinages de cuivre
- Bon rendement

Avant de développer le modèle mathématique de la GSAP, plusieurs hypothèses importantes doivent être prises en compte [31] :

- l'effet d'amortissement dans les aimants et dans le rotor sont négligeables ;
- les effets de saturation magnétique sont négligés ;
- les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligés ;
- la force contre-électromotrice (*FEM*) induites dans les enroulements du stator sont sinusoïdale

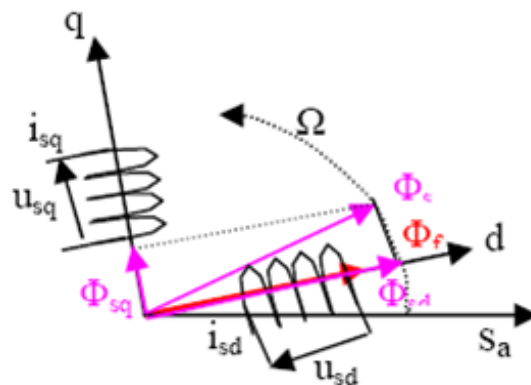


Figure 2.11 Schéma de la machine synchrone

L'équation électrique de la GSAP coté stator en triphasés est:

$$\begin{aligned}
v_a &= R.i_a + \frac{d\Phi_a}{dt} \\
v_b &= R.i_b + \frac{d\Phi_b}{dt} \\
v_c &= R.i_c + \frac{d\Phi_c}{dt}
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Sous forme matricielle :

$$[V_s] = R_s [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \tag{2.16}$$

Avec : $[V_s]$ notation vectorielle des tensions des phases statoriques (V)

$[I_s]$ notation vectorielle des courants des phases statoriques (I)

$[\varphi_s]$ notation vectorielle des flux des phases statoriques

R_s = Résistance statorique

Le flux induits sur les enroulements statoriques pour la phase aa', le flux totalisé Φ_a représente la somme de quatre termes:

$$\text{Flux propre de a sur a : } \Phi_{aa} = L_s.i_a.$$

$$\text{Flux mutuel de b sur a : } \Phi_{ba} = M_s.i_b.$$

$$\text{Flux mutuel de c sur a : } \Phi_{ca} = M_s.i_c.$$

$$\text{Flux mutuel de l'inducteur sur a : } \Phi_{fa} = \Phi_f.\cos(\theta_e)$$

$$\Phi_a = \Phi_{aa} + \Phi_{ba} + \Phi_{ca} + \Phi_{fa} = L_s.i_a + M_s.(i_b + i_c) + \Phi_{fa} \tag{2.17}$$

En posant le neutre non relié. ($i_b + i_c = -i_a$), cette dernière relation s'écrit:

$$\Phi_a = (L_s - M_s).i_a + \Phi_{fa} = L_c.i_a + \Phi_{fa} \tag{2.18}$$

Sur les deux autres phases :

$$\Phi_b = (L_s - M_s).i_b + \Phi_{fb} = L_c.i_b + \Phi_{fb}$$

$$\Phi_c = (L_s - M_s).i_c + \Phi_{fc} = L_c.i_c + \Phi_{fc}$$

$$\text{Avec : } \Phi_{fc} = \Phi_f.\cos(\theta_e + \frac{2.\pi}{3}) \text{ et } \Phi_{fb} = \Phi_f.\cos(\theta_e - \frac{2.\pi}{3})$$

Φ_f : Flux de l'aimant permanent

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine GSAP (des relations indépendantes et réduction d'ordre des équations de la machine), on applique un changement de repère

(transformation de Park [32]). Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les l'axes d et q , où dans le cas de la GSAP l'axe d est orienté suivant le rotor, c'est-à-dire suivant la direction de l'aimantation.

La matrice de transformation de *Park* est définit comme suit

$$P(\theta_r) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_r & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Et l'équation qui traduit le passage du système triphasé au système diphasé (d,q) est donnée par :

$$X_{dq0} = P(\theta_r) X_{abc}^T \quad (2.20)$$

Pour faire l'opération inverse, le passage du système diphasé (d,q) au système triphasé, on utilise l'équation suivante :

$$X_{abs} = P(\theta_r)^{-1} X_{dq0}^T \quad (2.21)$$

Avec la matrice de la transforme inverse de park :

$$P(\theta_r)^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Le modèle de la machine après la transformation de *Park* dans un repère de référence lié au champ tournant est donné par :

$$u_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - p\Omega_{mec} \cdot \Phi_{sq} \quad (2.23)$$

$$u_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + p\Omega_{mec} \cdot \Phi_{sd} \quad (2.24)$$

Avec, le flux d'axes directe et en quadrature comme suit:

$$\Phi_{sd} = L_d \cdot i_{sd} + \Phi_f \quad (2.25)$$

$$\Phi_{sq} = L_q \cdot i_{sq} \quad (2.26)$$

Le couple électromagnétique du moteur peut être exprimé comme suit,

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \left[\phi_f \cdot I_{sq} + (L_d - L_q) \cdot I_{sd} \cdot I_{sq} \right] \quad (2.27)$$

avec:

Ω_{mec} : la vitesse de rotation de la GSAP (*rad/s*),

P : nombre de pair de pôles,

J : moment d'inertie total du rotor,

f : Coefficient de frottement (*(N.m.s/rad)*),

C_r : couple résistant de la charge (*N.m*),

L_d : Inductances d'axe direct,

L_q : Inductances d'axe en quadrature,

R_s : Résistance des enroulements statoriques,

Φ_f : Flux induit par les aimants permanents.

A partir des équations (2.23) (2.24) (2.25) et (2.26) on obtient le modèle mathématique de la machine GSAP sous forme d'équation d'état:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (-\frac{R_s}{L_d})i_{sd} + (p \cdot \frac{L_q}{L_d})i_{sq}\omega_r \\ (-\frac{R_s}{L_q})i_{sq} - (p \cdot \frac{L_d}{L_q})i_{sd}\omega_r - (p \cdot \frac{\phi_f}{L_q})\omega_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

En utilisant la transformation dq, la puissance active et réactive est donnée par :

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} (u_{sd} I_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \\ Q &= \frac{3}{2} (u_{sd} I_{sq} + u_{sq} i_{sd}) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Si le repère est tel que $u_{qs} = 0$ et $u_{ds} = |V|$, les équations pour la puissance active et réactive deviennent :

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} (u_{sd} I_{sd}) \\ Q &= \frac{3}{2} (u_{sd} I_{sq}) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Par conséquent, la puissance active et réactive peut être contrôlé en contrôlant les composantes de courant direct et en quadrature, respectivement.

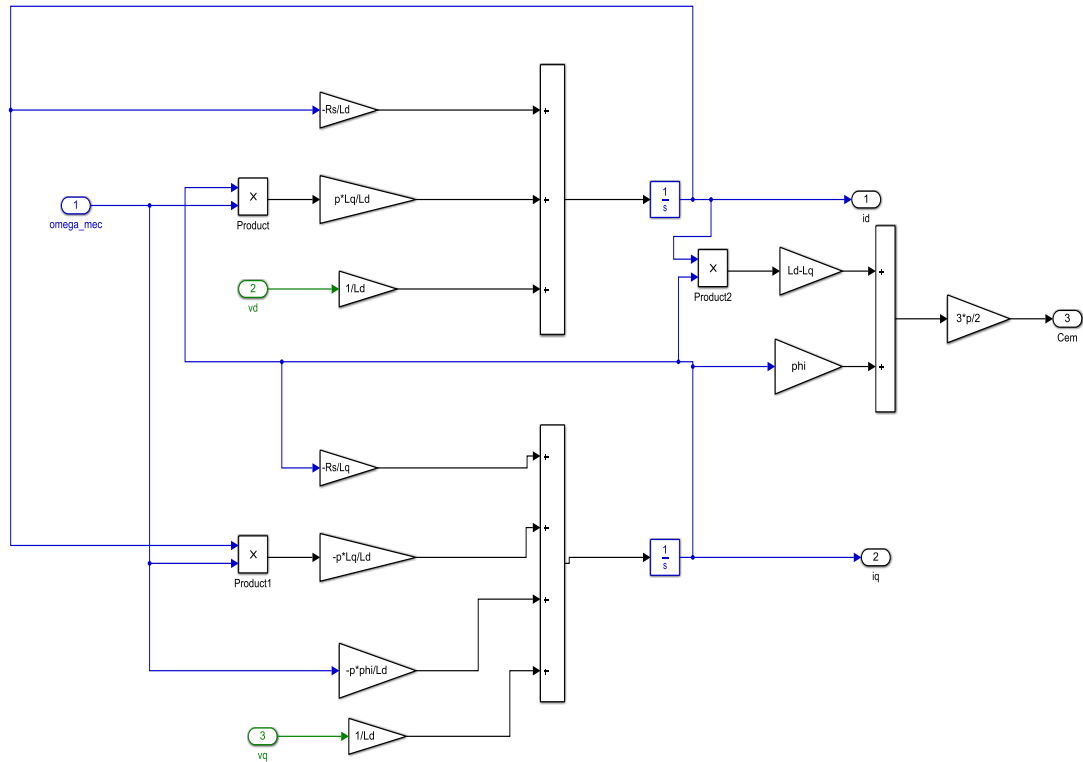


Figure 2.12 Schéma bloc de la machine GSAP (partie électrique d'éolienne) sous matlab/simulink

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents éléments d'une éolienne, puis nous avons présenté un comparatif de différents types d'éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesses variable. À partir de ce comparatif, nous nous sommes intéressés à l'éolienne à vitesses variable, où une modélisation détaillée de chaque élément de l'éolienne a été reportée (partie mécanique et partie électrique) avec simulation des blocs sous matlab/simulink.

Le chapitre suivant présente une nouvelle approche MPPT pour extraire la puissance maximale possible dans l'éolienne en utilisant PSO avec la commande passive.

2.6. Bibliographie

- [1] GIPE, Paul. *Le grand livre de l'éolien*. Observ'ER: Ed. du Moniteur, 2007.
- [2] RAPIN, Marc et NOËL, Jean-Marc. *Énergie éolienne-2e éd.: Du petit éolien à l'éolien off shore*. Dunod, 2014.
- [3] RAPIN, Marc et NOËL, Jean-Marc. *Energie éolienne*. Dunod, 2010.

- [4] BOUKHEZZAR, Boubekeur. *Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable*. 2006. Thèse de doctorat. Université Paris Sud-Paris XI.
- [5] EL AIMANI, Salma. *Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*. 2004. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.
- [6] TONG, Wei. *Wind power generation and wind turbine design*. Wit Press, 2010.
- [7] ALI, Mohd Hasan. *Wind energy systems: solutions for power quality and stabilization*. CRC Press, 2012.
- [8] Erich, Hau, *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd ed. Springer, 2005
- [9] BOUKHEZZAR, Boubekeur et SIGUERDIDJANE, Houria. Comparison between linear and nonlinear control strategies for variable speed wind turbines. *Control Engineering Practice*, 2010, vol. 18, no 12, p. 1357-1368.
- [10] BOUKHEZZAR, Boubekeur, LUPU, L., SIGUERDIDJANE, Houria, *et al.* Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines. *Renewable Energy*, 2007, vol. 32, no 8, p. 1273-1287.
- [11] BOUKHEZZAR, Boubekeur et SIGUERDIDJANE, Houria. Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization. *Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50, no 4, p. 885-892.
- [12] POITIERS, Frédéric. *Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau*. 2003. Thèse de doctorat. Université de Nantes.
- [13] CAMBLONG, Haritza. *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*. 2003. Thèse de doctorat. Paris, ENSAM.
- [14] YANJIE, Liu et JUN, Wang. A large time scale wind velocity simulation method. In : *Computer Design and Applications (ICCD), 2010 International Conference on*. IEEE, 2010. p. V4-282-V4-286.
- [15] DUBOIS, Corinne. *Le guide de l'éolien, techniques et pratiques*. éditions Eyrolles, 2009.
- [16] MANWELL, James F., MCGOWAN, Jon G., et ROGERS, Anthony L. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.

- [17] VERMEER, L. J., SØRENSEN, Jens Nørkær, et CRESPO, A. Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in aerospace sciences*, 2003, vol. 39, no 6, p. 467-510.
- [18] TEMPLIN, R. J. *Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine*. National Aeronautical Establishment, Ottawa, Ontario (Canada), 1974.
- [19] BAZILEVS, Y., HSU, M.- C., AKKERMAN, I., *et al.* 3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2011, vol. 65, no 1- 3, p. 207-235.
- [20] HANSEN, Martin OL. *Aerodynamics of wind turbines*. Routledge, 2015.
- [21] DAHBI, Abdeldjalil, NAIT-SAID, Nasreddine, et NAIT-SAID, Mohamed-Said. A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016.
- [22] JARAMILLO-LOPEZ, Fernando, KENNE, Godpromesse, et LAMNABHILAGARRIGUE, Françoise. A novel online training neural network-based algorithm for wind speed estimation and adaptive control of PMSG wind turbine system for maximum power extraction. *Renewable Energy*, 2016, vol. 86, p. 38-48.
- [23] TIWARI, Ramji et BABU, N. Ramesh. Fuzzy Logic Based MPPT for Permanent Magnet Synchronous Generator in wind Energy Conversion System. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no 1, p. 462-467.
- [24] RAJAN SINGARAVEL, M. M. et DANIEL, S. Arul. MPPT With Single DC–DC Converter and Inverter for Grid-Connected Hybrid Wind-Driven PMSG–PV System. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2015, vol. 62, no 8, p. 4849-4857.
- [25] WEI, Qiang et WU, Bin. Analysis and comparison of current-source-converter-based medium-voltage PMSG wind energy conversion systems. In : *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2015 IEEE 6th International Symposium on*. IEEE, 2015. p. 1-6.
- [26] KANG, Tahyun, KANG, Taewon, CHAE, Beomseok, *et al.* Comparison of voltage source and current source based Converter in 5MW PMSG wind turbine systems. In : *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015 9th International Conference on*. IEEE, 2015. p. 894-901.
- [27] MEGHNI, Billel, SAADOUN, Abdallah, DIB, Djalel, *et al.* Effective MPPT technique and robust power control of the PMSG wind turbine. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2015, vol. 10, no 6, p. 619-627.

- [28] KOCH, Gustavo G., SCHNEIDER, Gilberto, ZUCUNI, Jordan, *et al.* Direct scalar torque control for wind turbine with permanent magnet synchronous generator. In : *Clean Electrical Power (ICCEP), 2015 International Conference on.* IEEE, 2015. p. 265-269.
- [29] VAN, Tan Luong, NGUYEN, Thanh Hai, et LEE, Dong-Choon. Advanced pitch angle control based on fuzzy logic for variable-speed wind turbine systems. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2015, vol. 30, no 2, p. 578-587.
- [30] HUANG, Can, LI, Fangxing, et JIN, Zhiqiang. Maximum power point tracking strategy for large-scale wind generation systems considering wind turbine dynamics. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2015, vol. 62, no 4, p. 2530-2539.
- [31] ARROYO, Enrique L. Carrillo. *Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system.* 2006. Thèse de doctorat. University Of Puerto Rico Mayagüez Campus.
- [32] KRISHNAN, Ramu. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives.* CRC press, 2009.

Chapitre 3

Contribution à la commande MPPT des éoliennes à vitesse variable

Sommaire

3.1	Introduction	51
3.2	Zones de fonctionnement des éoliennes	52
3.3	Description de l'algorithme MPPT proposé pour les générateurs éoliens	53
3.3.1.	MPPT par optimisation par essais particuliers	54
3.4.	La stabilisation par la commande passive	59
3.4.1.	Présentation de la commande passive	59
3.4.2.	Application de la commande passive pour le contrôle de la machine PMSG....	60
3.5.	Conclusion	65
3.6.	Bibliographie	65

Chapitre 3

Contribution à la commande MPPT des éoliennes à vitesse variable

3.1 Introduction

Les systèmes de conversion d'énergie de vent ont attiré une grande attention en tant que source d'énergie renouvelable en raison de l'épuisement des réserves de combustibles fossiles et les préoccupations environnementales comme une conséquence directe de l'utilisation de combustibles fossiles et de sources d'énergie nucléaires. L'énergie éolienne, même si abondante, varie continuellement à mesure que les changements de vitesse du vent tout au long de la journée. La quantité de puissance de sortie d'un système de conversion d'énergie éolienne (WECS) dépend de la précision avec laquelle les points de puissance de crête sont suivis par le contrôleur de suivi du point de puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking) du système de commande WECS quel que soit le type de générateur utilisé [1-3].

Un grand nombre de techniques MPPT pour les éoliennes ont été étudié et rapporté dans la littérature, ils peuvent être regroupés en quatre méthodes principales :

- Commande recherche du sommet *Hill Climbing Searching* [4-7].
- Commande du rapport de vitesse spécifique (TSR) [8-10].
- Contrôle de l'ouverture de la pale [11-13].
- Par rétroaction du *signal de puissance PSF (Power Signal Feedback)* [14-15].

Chacune des méthodes précédentes présentent des avantages et inconvénients, la méthode de contrôle de l'ouverture des pales est appliquée pour les vents forts, par contre les autres approches pour les vents faibles. Dans ce chapitre on propose une nouvelle approche MPPT applicable pour les vents faibles ainsi que pour les vents fort, elle repose sur l'optimisation du coefficient de puissance avec la méthode Optimisation par essaims Particulaires PSO (Particale Swarm Optimizaion) ce qui nous permet non seulement de contrôler l'ouverture des pales, mais aussi le rapport de vitesse spécifique (TSR). Cette

approche d'optimisation sera associée avec la commande passive vu sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre.

3.2 Zones de fonctionnement des éoliennes

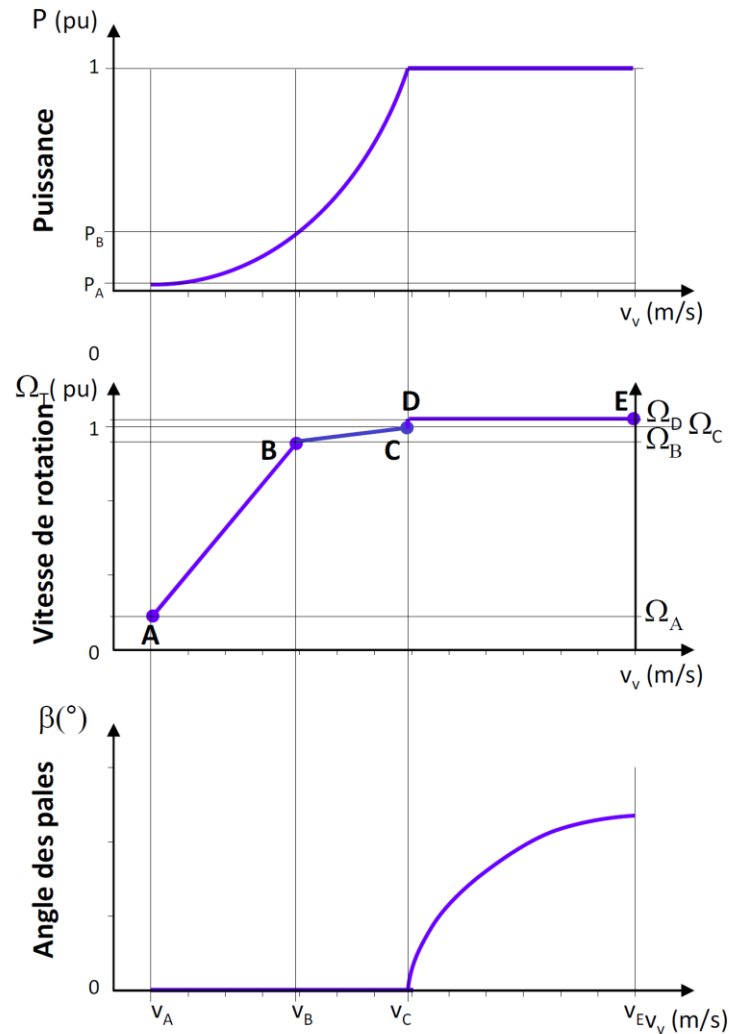


Figure 3.1 Zones de fonctionnement des éoliennes [16]

Il est important de comprendre la relation entre la puissance et la vitesse du vent pour déterminer le type de contrôle requis, l'optimisation, ou la limitation. La courbe de puissance spécifie la quantité d'énergie qu'on peut extraire du vent entrant. La Figure 3.1 résume le principe général de fonctionnement de l'éolienne.

Suivant la vitesse du vent on définit les zones de fonctionnement des éoliennes [17-19] :

La zone a : Pour des vitesses très faibles du vent, il y a un couple insuffisant exercé par le vent sur les pales de la turbine pour les faire tourner. Cependant, comme la vitesse

augmente, la turbine éolienne commencera à tourner et produire de l'énergie électrique. La vitesse à laquelle la turbine commence d'abord à tourner et produire de l'énergie est appelée vitesse minimale de démarrage de 3m/s à 4m/s.

La zone a-d : est la zone d'extraction maximale, elle correspond au fonctionnement à Charge Partielle (C_p). Ici l'objectif est d'optimiser le rendement énergétique. Ainsi, la vitesse de rotation mécanique évolue en fonction de la vitesse du vent de sorte à se maintenir au point de fonctionnement à rendement aérodynamique maximal. Le but étant que le coefficient de puissance soit toujours optimum.

La zone d-e : la vitesse de rotation mécanique atteint la valeur de la vitesse nominale ; correspond au fonctionnement à pleine charge. Il faut limiter la puissance afin de ne pas détériorer le système, pour cela, on contrôle l'éolienne à travers l'angle d'inclinaison des pales qui varie.

Au delà de de la zone e : après la vitesse de coupure, l'éolienne est mise à l'arrêt pour protection, la puissance de sortie est nulle.

3.3 Description de l'algorithme MPPT proposé pour les générateurs éoliens

Afin de générer le maximum de puissance, on doit définir les valeurs optimales de l'angle d'inclinaison de la pale et de la vitesse de rotation mécanique. Plusieurs approches ont été proposé en littérature, qui repose sur la fixation de l'angle d'inclinaison de la pale et l'optimisation du rapport de la vitesse spécifique afin de déduire la vitesse de rotation mécanique optimal en utilisant les algorithmes génétiques associé avec la commande PI [20], par contre dans ce travail de thèse, on propos l'utilisation de l'optimisation par PSO pour estimer non seulement la vitesse de rotation mécanique optimal , mais aussi l'angle d'inclinaison de la pale ce qui permet d'obtenir le maximum de puissance pour n'importe quelle valeur du vent.

L'objective est la maximisation de C_p pour chaque valeur du vent en fonction du rapport de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'inclinaison des pales β afin d'extraire le maximum de puissance P_t .

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3\beta - c_4 \right) \cdot e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + c_6\lambda$$

Où : β_i exprimé en degrés. $c_1 = 0.5109$; $c_2 = 116$; $c_3 = 0.4$; $c_4 = 5$; $c_5 = 21$; $c_6 = 0.0068$;

Pour cela, on utilise l'algorithme d'Optimisation par essais.

3.3.1. MPPT par optimisation par essais particuliers

L'optimisation par essais particuliers « Particle Swarm Optimization (PSO) » est une méthode d'optimisation stochastique, pour les fonctions non-linéaires développé par James Kennedy et Russell Eberhart en 1995 [21-23] après s'être inspiré des observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons par le biologiste Frank Heppner [24].

PSO partage de nombreuses similitudes avec des techniques de calcul évolutives telles que l'algorithme génétique (AG). Le système est initialisé avec une population de solutions aléatoires et recherche d'optima par la mise à jour des générations. Cependant, contrairement à GA, PSO n'a pas d'opérateurs d'évolution comme le croisement et la mutation. L'optimisation par essaim de particules repose sur un ensemble d'individus originellement disposés de façon aléatoire et homogène, que nous appellerons dès lors des particules, qui se déplacent dans l'hyper-espace de recherche et constituent, chacune, une solution potentielle [25].

Chaque particule représente une solution potentielle dans l'espace de recherche. La nouvelle position d'une particule est déterminée en fonction de sa propre valeur et celle de ses voisines. Soit $\vec{x}_i(t)$ la position de la particule P_i au temps t , sa position est modifiée en ajoutant une vitesse $\vec{v}_i(t)$ à sa position courante :

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (3.2)$$

La vitesse de chaque particule est mise à jour suivant l'équation suivante :

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 [x_{p_i}(t) - x_i(t)] + c_2 r_2 [g(t) - x_i(t)] \quad (3.3)$$

$v_i(t)$ est la vitesse de particule i à l'instant t et $x_i(t)$ est la position de particule i à l'instant t , les paramètres w , c_1 , et c_2 ($0 \leq w \leq 1.2$, $0 \leq c_1 \leq 2$, et $0 \leq c_2 \leq 2$) sont des coefficients constants fixés par l'utilisateur, r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires tirés à chaque itération, $g(t)$ est la meilleure solution trouvée jusqu'à l'instant t et $x_{p_i}(t)$ est la meilleure solution trouvée par la particule i . C'est la vitesse qui dirige le processus de recherche et reflète la

"sociabilité" des particules, les variables et paramètres de l'algorithme sont les suivants [26] :

N nombre de particules

$\vec{x}_i(t)$ Position de la particule P_i

\vec{v}_i vitesse de la particule P_i

$pbest_i$ Meilleure fitness obtenue pour la particule P_i

\vec{x}_{pbest_i} Position de la particule P_i pour la meilleure fitness

\vec{x}_{gbest_i} Position de la particule ayant le meilleur fitness de toutes

ρ_1, ρ_2 Valeurs aléatoires positives

L'algorithme de la méthode d'optimisation par essais particulaires est donné comme suit [26] :

Initialisations :

Initialiser aléatoirement la population.

Traitement :

Répéter

Pour i de 1 à N faire

Si ($F(\vec{x}_i) > pbest_i$) **Alors**

$$pbest_i \leftarrow F(\vec{x}_i)$$

$$\vec{x}_{pbest_i} \leftarrow \vec{x}_i$$

Fin Si

Si ($F(\vec{x}_i) > gbest_i$) **Alors**

$$gbest_i \leftarrow F(\vec{x}_i)$$

$$\vec{x}_{gbest_i} \leftarrow \vec{x}_i$$

Fin Si

Fin Pour

Pour i de 1 à N faire

$$\vec{v}_i \leftarrow \vec{v}_i + \rho_1(\vec{x}_{pbest_i} - \vec{x}_i) + \rho_2(\vec{x}_{gbest_i} - \vec{x}_i)$$

$$\vec{x}_i \leftarrow \vec{x}_i + \vec{v}_i$$

Fin Pour

Jusqu'à ce que (le processus converge)

Cette méthode d'optimisation présente certains avantages intéressants, qui font d'elle une très bonne technique d'optimisation, particulièrement pour les problèmes fortement non linéaires, parmi lesquels on cite :

- Facilité de programmation : quelques lignes de code suffisent dans n'importe quel langage évolué,
- robuste : malgré de mauvais choix de paramètres dégradent les performances, mais n'empêchent pas d'obtenir une solution.

Le profil du vent choisit est un profil qui englobe les vents faibles et forts il correspond à une variation comprise entre 5.5m/s et 16m/s (Figure 3.2) et les paramètres de l'éolienne, de la GSAP ainsi que celui de l'algorithme par PSO sont données en annexe.

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures : (3.3, 3.4 et 3.5). Comme on le voit sur ces figures, pour des valeurs du vent inférieures à 12m/s, l'angle d'inclinaison des pales est nul, le coefficient de puissance est constant et égale 0.48 et la vitesse de rotation mécanique augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent. Lorsque le vent devient fort, (plus de 12m/s), les pales s'ouvrent et l'angle d'inclinaison augmente, par contre, la vitesse de rotation mécanique de référence devient fixe et le coefficient de puissance diminue.

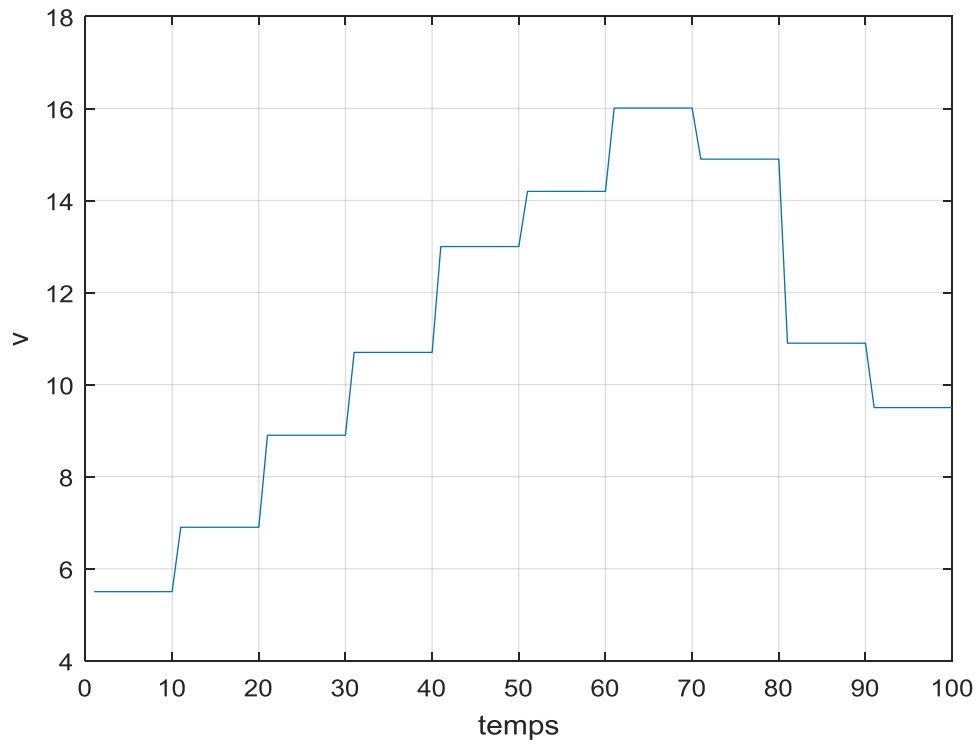


Figure 3.2 Profil du vent

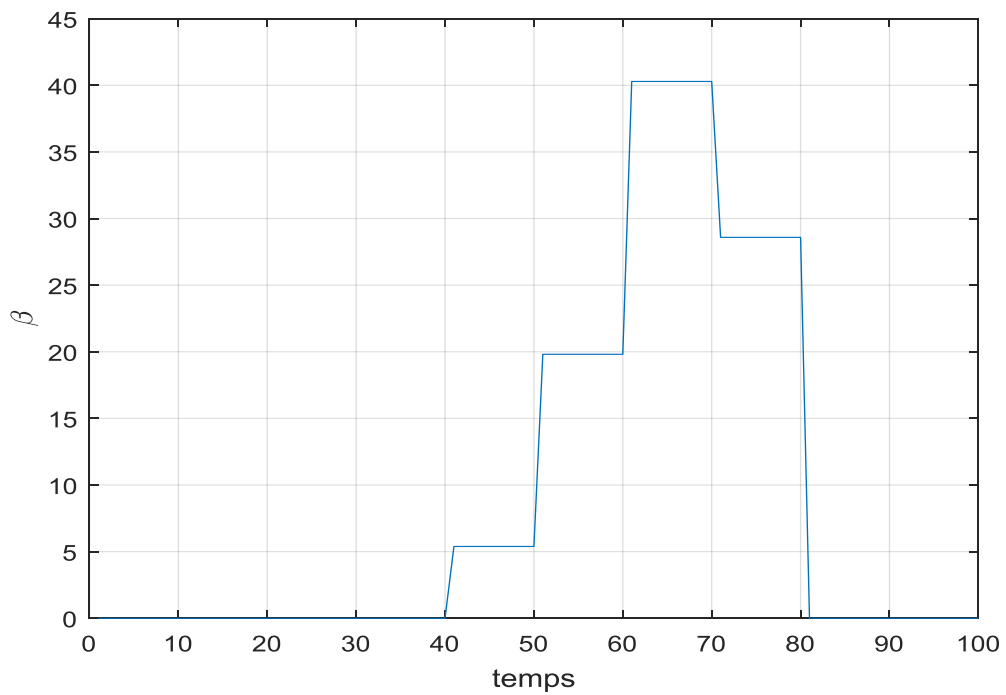


Figure 3.3 Angle d'inclinaison des pales

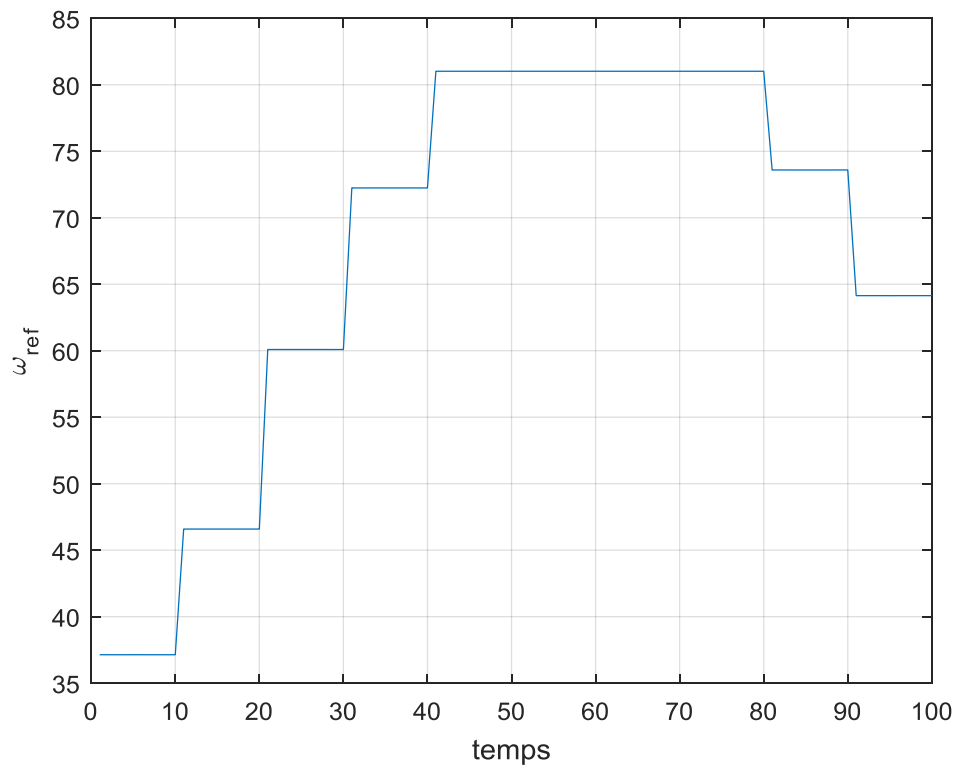


Figure 3.4 Vitesse de rotation mécanique

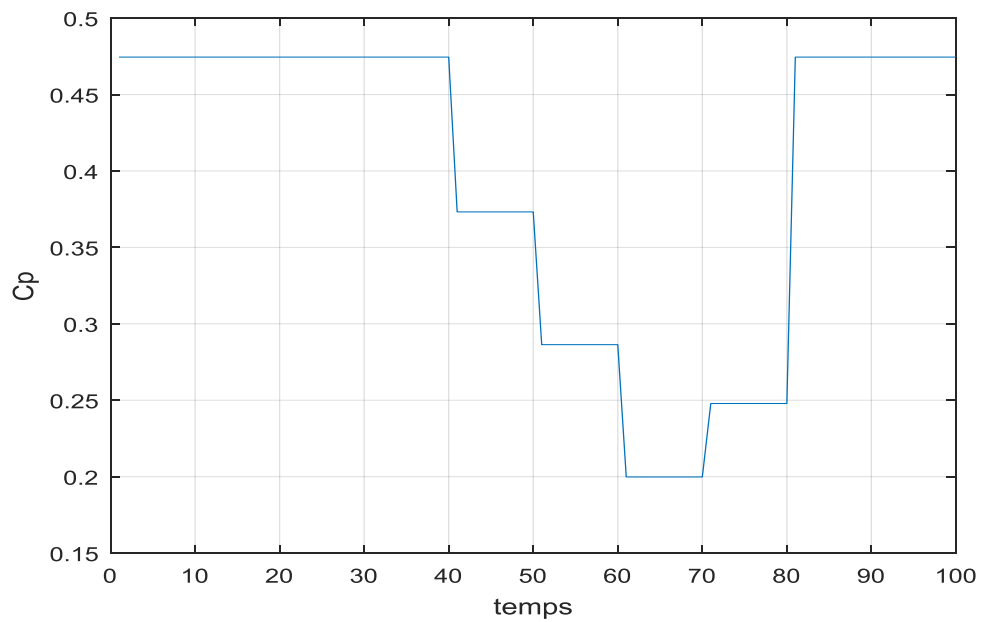


Figure 3.5 Coefficient de puissance

3.4. La stabilisation par la commande passive

Dans cette partie, nous allons étudier la commande passive et appliquer ses propriétés pour contrôler la GSAP. A la fin, des simulations seront présentées pour illustrer l'efficacité de cette commande.

3.4.1. Présentation de la commande passive

Nous allons essayer de donner quelques définitions clefs dans la théorie des systèmes non linéaires pour pouvoir bien comprendre la notion de la passivité :

- **Systèmes dissipatifs**

Considérons un système non linéaire de la forme : [27-28]

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= h(x(t)) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Le système (3.4) est dissipatif par rapport au « débit énergétique » $w(t)$ s'il existe une fonction continue non négative, $V : X \rightarrow R$, appelé fonction de stockage, qui satisfait :

$$V(x(t)) - V(x(0)) \leq \int_0^t w(s) ds \quad (3.5)$$

- **Définition interne de la passivité**

Le système (3.4) est passif s'il est dissipatif par rapport au « débit énergétique » $w(u, y) = u^T y$ et si la fonction de stockage satisfait $V(0) = 0$.

Cette dernière définition de la passivité se résume à :

$$V(x(t)) - V(0) \leq \int_0^t u^T(s) y(s) ds \quad (3.6)$$

De la relation (3.6) on obtient des résultats fondamentaux sur la stabilité du système. Si l'on fixe $u^T = 0$ on observe une décroissance de $V(x)$ à partir de n'importe quelle trajectoire de système (3.4), ce qui montre que les systèmes passifs avec une fonction de stockage définie positive sont stables au sens de Lyapunov. La même propriété est observée si l'on annule la sortie ($y = 0$), ce qui implique une dynamique des zéros stables.

Définition 1 [28]: Le système (3.4) est un système à minimum de phase avec $L_g 0h(0)$ est non-singulière si sa dynamique des zéros est asymptotiquement stable au voisinage de $x=0$

Définition 2 [29]: Le système (3.4) est passif s'il existe une constante $\rho > 0$ et une constante réelle β , telle que :

$$\int u^T(t)y(t)dt + \beta \geq \rho \int y^T(t)y(t)dt \quad (3.7)$$

Le système passif (3.4) peut s'écrire sous la forme suivante [29]:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= f(z) + g(z, y)y \\ \dot{y} &= l(z, y) + k(z, y)u \end{aligned} \quad (3.8)$$

Si le système (3.4) est à minimum de phase, le système (3.8) sera équivalent à un système passif et il pourrait être asymptotiquement stabilisé aux points souhaités ou à l'équilibre par l'intermédiaire de la commande suivante [29]:

$$u = k(z, y)^{-1} \left[-l(z, y) - \frac{\partial W(z)}{\partial z} g(z) - \gamma y + \eta \right] \quad (3.10)$$

Ou, $W(z)$ est la fonction de Lyapunov, γ est un gain strictement positif et η est un signal extérieur.

3.4.2. Application de la commande passive pour le contrôle de la machine PMSG

Le système non-linéaire d'une GSAP est défini comme suit [30-31]:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{v_d}{L_d} - \frac{R}{L_d} i_d + \omega_r p \frac{L_q}{L_d} i_q \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{v_q}{L_q} - \frac{R}{L_q} i_q - \omega_r p \frac{L_d}{L_q} i_d - \omega_r p \frac{\phi_m}{L_q} \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{3p\phi_m}{2J} i_q + \frac{3p}{2J} (L_q - L_d) i_d i_q - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{1}{J} T_L \end{aligned} \quad (3.11)$$

On pose : $z = [z_1] = [w_r]$, $y = [y_1, y_2]^T = [i_d, i_q]^T$ et $T_L = 0$ $u = [v_d, v_q]^T$; alors, le système (3.11) peut être écrit comme suit:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= \frac{u_1}{L_d} - \frac{R}{L_d} y_1 + z_1 p \frac{L_q}{L_d} y_2 \\ \frac{dy_2}{dt} &= \frac{u_2}{L_q} - \frac{R}{L_q} y_2 - z_1 p \frac{L_d}{L_q} y_1 - z_1 p \frac{\phi_m}{L_q} \\ \frac{dz_1}{dt} &= \frac{3p\phi_m}{2J} y_2 + \frac{3p}{2J} (L_q - L_d) y_1 y_2 - \frac{B}{J} z_1 - \frac{1}{J} T_L \end{aligned} \quad (3.12)$$

En mettant le système (3.12) sous la forme de (3.8), on trouve

$$f(z) = \left[-\frac{B}{J} z_1 \right], \quad g(z, y) = \left[\frac{3p}{2J} (L_q - L_d) y_2, \frac{3p\phi_m}{2J} \right]$$

$$l(z, y) = \begin{bmatrix} \frac{R}{L_d} y_1 + \omega_r p \frac{L_q}{L_d} y_2 \\ -\frac{R}{L_q} y_2 - \omega_r p \frac{L_d}{L_q} y_1 - z_1 p \frac{\phi_m}{L_q} \end{bmatrix}, \quad k(z, y) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}$$

Notre objectif est de concevoir une commande souple pour contrôler la GSAP de l'éolienne afin de suivre la référence issue de l'optimisation par PSO.

Théorème : *le système (3.12) est passif avec la commande suivante*

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d \left(-\frac{R}{L_d} i_d - \omega_r p \frac{L_q}{L_d} i_q - \frac{3p}{2J} (L_q - L_d) i_q w_r - \gamma_1 i_d + \eta_1 \right) \\ L_q \left(\frac{R}{L_q} i_q + \omega_r p \frac{L_d}{L_q} i_d + w_r p \frac{\phi_m}{L_q} - \frac{3p\phi_m}{2J} w_r - \gamma_2 i_q + \eta_2 \right) \end{bmatrix}$$

Démonstration du théorème :

Pour cela, on choisit la fonction de stockage suivante :

$$V(z, y) = W(z) + \frac{1}{2} y_1^2 + \frac{1}{2} y_2^2 \quad (3.13)$$

Où $W(z)$ est une fonction de Lyapunov avec $W(0) = 0$,

$$W(z) = \frac{1}{2} (z_1^2) \quad (3.14)$$

La dérivée de $W(z)$ lorsque $y=0$ est donnée par :

$$\dot{W}(z) = z_1 \dot{z}_1 = -\frac{B}{J} z_1^2 \quad (3.15)$$

De (3.15) on a : $\dot{W}(z) < 0$

On peut conclure que $f(z)$ est globalement asymptotiquement stable, ce qui signifie que le système (3.12) est minimum de phase conformément à la définition (1).

La dérivée de $V(z, y)$ le long de la trajectoire du système (3.12) est :

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}V(z, y) &= \frac{\partial}{\partial z}W(z)\dot{z} + y\dot{y} \\ &= \frac{\partial}{\partial z}W(z)f_0(z) + \frac{\partial}{\partial z}W(z)g(z, y)y + yl(z, y) + yk(z, y)u\end{aligned}\quad (3.16)$$

Puisque le système (3.15) est à minimum de phase, on obtient :

$$\frac{d}{dt}W(z)f_0(z) \leq 0 \quad (3.17)$$

L'équation (3.16) devienne :

$$\frac{d}{dt}V(z, y) \leq \frac{\partial}{\partial z}W(z)g(z, y)y + (l(z, y) + k(z, y)u)y \quad (3.18)$$

la loi de commande est donnée comme suit :

$$u = k(z, y)^{-1}[-l^T(z, y) - \frac{\partial W(z)}{\partial z}g(z, y) - \gamma y + \eta] \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d(-\frac{R}{L_d}i_d - \omega_r p \frac{L_q}{L_d}i_q - \frac{3p}{2J}(L_q - L_d)i_q w_r - \gamma_1 i_d + \eta_1) \\ L_q(\frac{R}{L_q}i_q + \omega_r p \frac{L_d}{L_q}i_d + w_r p \frac{\phi_m}{L_q} - \frac{3p\phi_m}{2J}w_r - \gamma_2 i_q + \eta_2) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

En remplaçant (3.20) dans (3.12) on obtient :

$$\frac{d}{dt}V(z, y) \leq -\gamma y^T y + \eta^T y \quad (3.21)$$

En intégrant les deux membres de l'inégalité (3.21)

$$V(z, y) - V(z_0, y_0) \leq \int_0^t -(\gamma)y^T(\tau)y(\tau)d\tau + \int_0^t \eta^T(\tau)y(\tau)d\tau \quad (3.22)$$

$V(z, y) \geq 0$ et $\rho = V(z_0, y_0)$

$$\int_0^t \eta^T(\tau)y(\tau)d\tau + \rho \geq V(z, y) + \int_0^t \gamma y^T(\tau)y(\tau)d\tau \geq \int_0^t \gamma y^T(\tau)y(\tau)d\tau \quad (3.23)$$

Ce résultat vérifie la définition (2). Le retour d'état donné par (3.23) peut rendre le système (3.4) passif.

Les résultats de simulations sont donnés sur les figures ci-dessous.

Comme on le voit, la commande passive permet au système de suivre la référence estimée à partir du PSO, en l'occurrence la vitesse de rotation mécanique et ce qui permet d'avoir

une puissance P_t égale à celle de référence. En résumé, on peut conclure que l'association de PSO et la commande passive permet à éolienne de capturer le maximum de puissance.

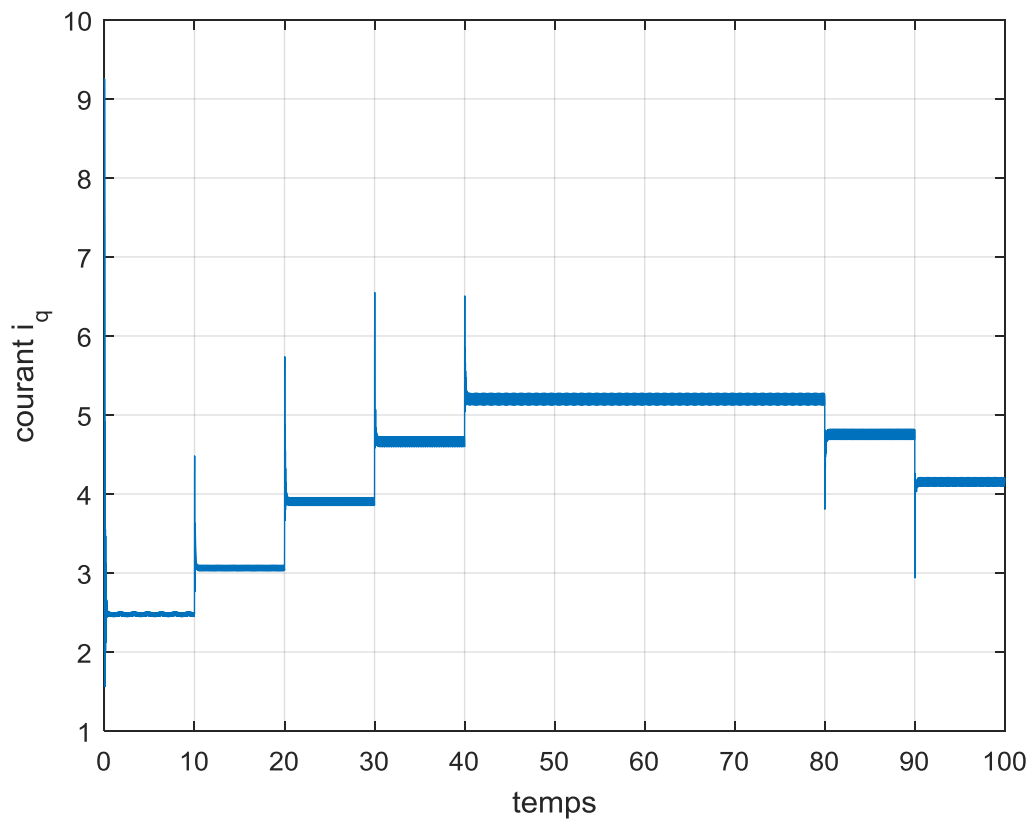


Figure 3.6 Courant I_q en fonction du temps

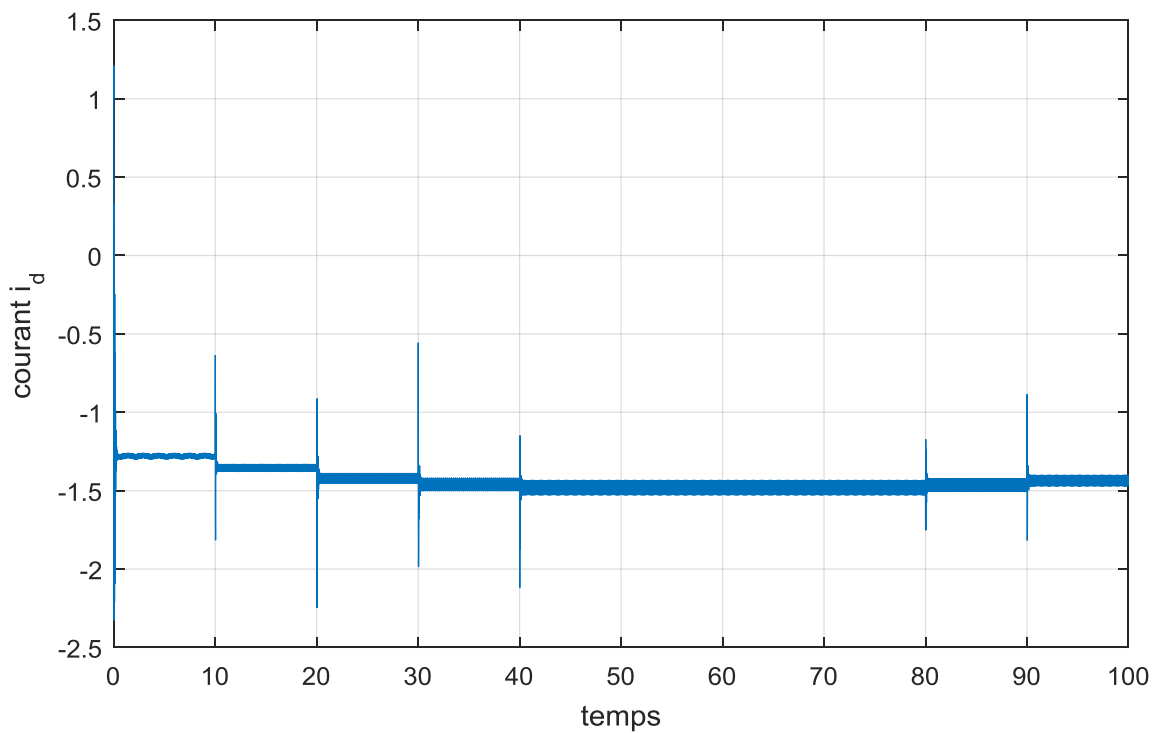
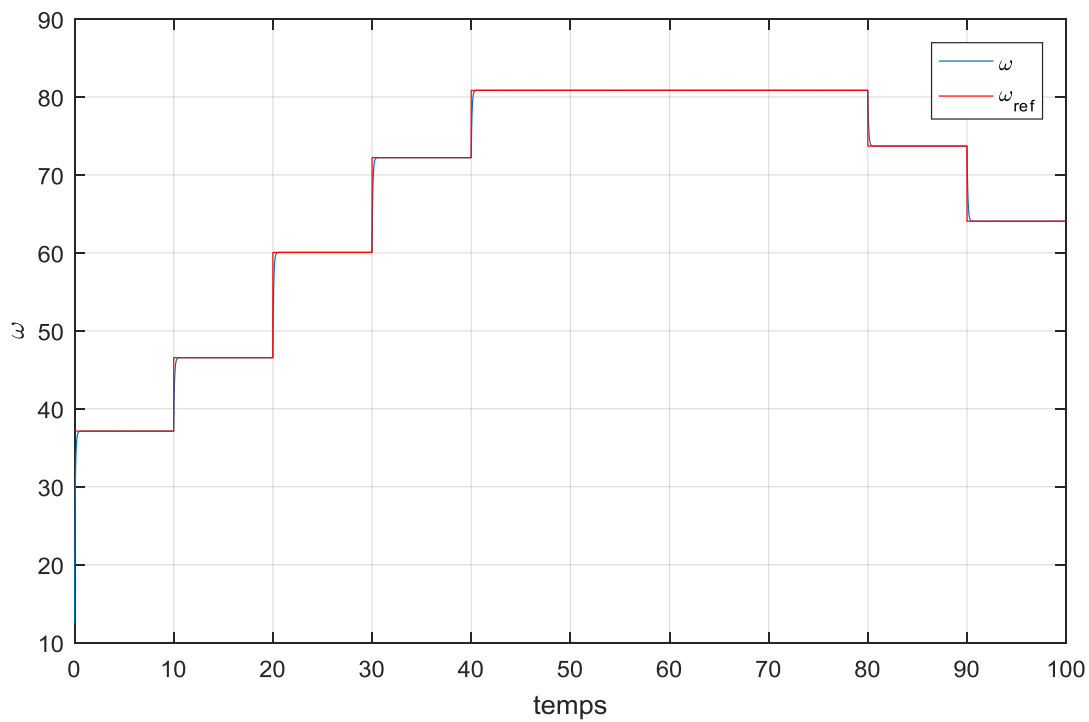
Figure 3.7 Courant I_d en fonction du temps

Figure 3.8 Vitesses de rotation mécanique de référence et mesurée en simulation du système éolien.

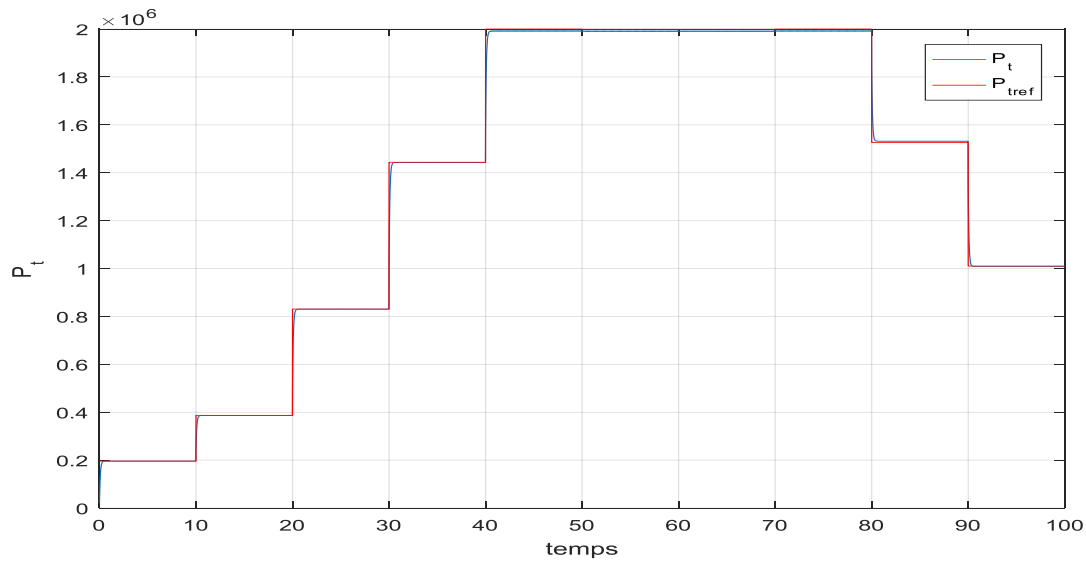


Figure 3.9 Puissance de référence et mesurée en simulation du système éolien.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une commande côté génératrice a été utilisée pour suivre la puissance maximale générée à partir d'une éolienne à vitesse variable en contrôlant la vitesse de rotation mécanique. La GSAP a été contrôlée par la commande passive et la référence de la vitesse ainsi que l'angle d'inclinaison des pales ont été obtenue à partir de l'optimisation par PSO afin d'extraire le maximum de puissance. L'avantage de cette approche se résume comme suit :

- Facilité de la reconfiguration pour application sur différents type d'éoliennes
- Rapidité de convergence de l'algorithme PSO.
- Souplesse de la commande passive.

3.6. Bibliographie

- [1] KOUTROULIS, Eftichios et KALAITZAKIS, Kostas. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2006, vol. 53, no 2, p. 486-494.

-
- [2] BARAKATI, S. Masoud, KAZERANI, Mehrdad, et APLEVICH, J. Dwight. Maximum power tracking control for a wind turbine system including a matrix converter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, vol. 24, no 3, p. 705-713.
- [3] BAROUDI, Jamal A., DINAHAHI, Venkata, et KNIGHT, Andrew M. A review of power converter topologies for wind generators. *Renewable energy*, 2007, vol. 32, no 14, p. 2369-2385.
- [4] KAZMI, Syed Muhammad Raza, GOTO, Hiroki, GUO, Hai-Jiao, *et al.* A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no 1, p. 29-36.
- [5] ZENG, Qingrong, CHANG, Liuchen, et SHAO, Riming. Fuzzy-logic-based maximum power point tracking strategy for Pmsg variable-speed wind turbine generation systems. In : *Electrical and Computer Engineering, 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on*. IEEE, 2008. p. 000405-000410.
- [6] KAZMI, Syed Muhammad Raza, GOTO, Hiroki, GUO, Hai-Jiao, *et al.* Review and critical analysis of the research papers published till date on maximum power point tracking in wind energy conversion system. In : *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*. IEEE, 2010. p. 4075-4082.
- [7] SHIRAZI, Meisam, VIKI, Abbas Hooshmand, et BABAYI, Omid. A comparative study of maximum power extraction strategies in PMSG wind turbine system. In : *Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE*. IEEE, 2009. p. 1-6.
- [8] HAN, Kun et CHEN, Guo-zhu. A novel control strategy of wind turbine MPPT implementation for direct-drive PMSG wind generation imitation platform. In : *Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC'09. IEEE 6th International*. IEEE, 2009. p. 2255-2259.
- [9] ABDULLAH, M. A., YATIM, A. H. M., TAN, C. W., *et al.* A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012, vol. 16, no 5, p. 3220-3227.
- [10] THONGAM, Jogendra Singh et OUHROUCHE, Mohand. *MPPT control methods in wind energy conversion systems*. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [11] ZHANG, Jianzhong, CHENG, Ming, CHEN, Zhe, *et al.* Pitch angle control for variable speed wind turbines. In : *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*. IEEE, 2008. p. 2691-2696.
-

- [12] DAHBI, Abdeldjalil, NAIT-SAID, Nasreddine, et NAIT-SAID, Mohamed-Said. A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, no 22, p. 9427-9442.
- [13] GHOUELBOURK, Sihem, DIB, Djalel, OMEIRI, Amar, *et al.* MPPT control in wind energy conversion systems and the application of fractional control ($PI\alpha$) in pitch wind turbine. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2016, vol. 26, no 2, p. 140-151.
- [14] CHEN, Zhe, GUERRERO, Josep M., et BLAABJERG, Frede. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. *IEEE Transactions on power electronics*, 2009, vol. 24, no 8, p. 1859-1875.
- [15] BELMOKHTAR, K., DOUMBIA, M. L., et AGBOSSOU, K. Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG (doubly-fed induction generator). *Energy*, 2014, vol. 76, p. 679-693.
- [16] MARIN CEBALLOS, David Humberto. *Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires*. 2009. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.
- [17] CAMBLONG, Haritza. *Modélisation et commande de systèmes éoliens*. 2009. Thèse de doctorat. Université du Havre.
- [18] BELTRAN, Brice, BENBOUZID, Mohamed, AHMED-ALI, Tarek, *et al.* Commande d'une éolienne à base de GADA par modes glissants d'ordre supérieur et observateur grand gain. *European Journal of Electrical Engineering*, 2012, vol. 15, no 6, p. 659-678.
- [19] EL AIMANI, Salma. *Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*. 2004. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.
- [20] SUMATHI, S., KUMAR, L. Ashok, et SUREKHA, P. *Solar PV and wind energy conversion systems: an introduction to theory, modeling with MATLAB/SIMULINK, and the role of soft computing techniques*. Springer, 2015.
- [21] EBERHART, Russell et KENNEDY, James. A new optimizer using particle swarm theory. In : *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*. IEEE, 1995. p. 39-43.
- [22] KENNEDY, James F., KENNEDY, James, EBERHART, Russell C., *et al.* *Swarm intelligence*. Morgan Kaufmann, 2001.

- [23] EBERHART, Russell C., SHI, Yuhui, et KENNEDY, James. *Swarm intelligence*. Elsevier, 2001.
- [24] HEPPNER, Frank et GRENANDER, Ulf. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. *The ubiquity of chaos*, 1990, p. 233-238.
- [25] CLERC, Maurice. L'optimisation par essaim particulaire. *Technique et Science Informatiques*, 2002, vol. 21, no 7, p. 941-964.
- [26] DUTOT, Antoine et OLIVIER, Damien. Optimisation par essaim de particules Application au problème des n-Reines. Support de cours, *Laboratoire Informatique du Havre, Université du Havre*, 2002.
- [27] KHALIL, Hassan K. *Nonlinear Systems*. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- [28] BYRNES, Christopher I., ISIDORI, Alberto, et WILLEMS, Jan C. Passivity, feedback equivalence, and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems. *IEEE Transactions on automatic control*, 1991, vol. 36, no 11, p. 1228-1240..
- [29] YU, Wen. Passive equivalence of chaos in Lorenz system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1999, vol. 46, no 7, p. 876-878.
- [30] YIN, Ming, LI, Gengyin, ZHOU, Ming, *et al.* Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. In : *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*. IEEE, 2007. p. 1-6.
- [31] CHEN, Xianfeng, SHU, Zhibing, et ZHAO, Yingkai. Mathematic Model and Performance Analysis of PMSM Based Servo System [J]. *Machinery & Electronics*, 2005, vol. 1, p. 41-43.

Chapitre 4

Commande prédictive d'une éolienne à comportement chaotique

Sommaire

4.1. Introduction	70
4.2. Rappel sur les systèmes chaotiques	71
4.2.2. Propriétés des systèmes chaotiques	71
4.2.2.1. Sensibilité aux conditions initiales	72
4.2.2. 2. Aspect aléatoire	72
4.2.2.3. Systèmes chaotiques et méthode de Lyapounov :	73
4.3. La commande prédictive à retour d'état :	75
4.3.1. La théorie de la commande prédictive à retour d'état	75
4.4. Application de la commande prédictive à retour d'état pour le contrôle de des éoliennes à comportement chaotique suite aux défauts dans leurs moteurs	78
4.4.1. Modélisation mathématique des générateurs à comportement chaotique dû aux défauts des composants	78
4.2.2. Modélisation mathématique des générateurs à comportement chaotique dû aux défauts de la commande	89
4.5. Conclusion	95
4.6. Bibliographie	96

Chapitre 4

Commande prédictive d'une éolienne à comportement chaotique

4.1. Introduction

L'application incessante de la machine synchrone à aimant permanent (GSAP) en industrie est due à ces avantages nombreux, parmi lesquels on peut citer :

- couple de démarrage élevé,
- facteur de puissance élevé,
- une efficacité élevée et une structure simple.. etc

Cependant, les caractéristiques chaotiques apparaîtront dans GSAP sous certains paramètres spécifiques et conditions de travail. Ce comportement chaotique va non seulement affecter la stabilité du système, la sécurité, et même mettre en danger son système de charge. Par conséquent, sur la base des problèmes du préjudice porté par le chaos dans le système, il est impératif d'adopter des méthodes de commande efficaces pour supprimer ou éliminer les phénomènes chaotiques dans le fonctionnement de la machine lorsque le GSAP chaotique provoque l'instabilité du système moteur.

Le premier modèle mathématique de la GSAP chaotique a été établi en 1994 par N. Hemanti [1]. En 2002, une étude plus détaillée du chaos dans le MASP a été achevée par Zhong et al. [2] et Y. Gao et al [3] (cycle limite de paramètre, Hopf bifurcation, exposant de Lyapunov, dimension fractale, spectre de puissance). Depuis, le contrôle du chaos dans les GASAP a émergé en tant que nouveaux axes de recherche et de nombreuses théories et méthodes ont été développées, telles que la méthode de corrélation unidirectionnelle [4], la méthode indirecte d'approximation neural adaptative [5], la méthode à mode glissant adaptative associée aux réseaux de neurones [6], la méthode à mode glissant d'ordre supérieur [7], la commande adaptative neural [8], la méthode adaptative à temps fini [9], la commande prédictive généralisée [10] et bien d'autres méthodes [11-15].

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'application de la commande prédictive [18-20] pour la commande du générateur chaotique dus aux défiances de la commande ou des composants passives dans le générateur d'une éolienne, en raison de sa simplicité de configuration et de mise en œuvre. C'est une technique très utilisé pour le contrôle des systèmes chaotiques en raison de ses avantages [16-19], par contre dans le cadre de notre travail, au lieu d'appliquer la commande sur un seul état du système et de choisir le gain comme une constante par tâtonnement dans un intervalle, on propose l'application de la commande sur plusieurs état du système et l'utilisation des LMIs pour calculer les gains.

4.2. Rappel sur les systèmes chaotiques

Dans le domaine scientifique, le chaos pourrait être défini comme «l'art de former du complexe à partir du simple ». Un système chaotique est donc un système déterministe et imprévisible mais c'est aussi et surtout un système non linéaire. Le lien qui relie ces deux notions paradoxales, déterminisme et imprévisibilité, est la propriété de sensibilité aux conditions initiales. En effet, deux conditions initiales (par exemple le couple position et vitesse du pendule) infiniment proches peuvent conduire à des états futurs très différents du système. La théorie du chaos est une discipline à part entière basée sur la théorie des systèmes dynamiques qui résulte, en partie, des travaux du mathématicien Henri Poincaré (1854-1912) à la fin du XIX^{ième} siècle. Ces implications sont extrêmement diversifiées. Cette théorie est utilisée pour prévoir l'évolution des populations avec la transformation de Myrberg (encore appelée transformation logistique). En 1963 le météorologue Edward Lorenz [20] expérimentait une méthode lui permettant de prévoir les phénomènes météorologiques. C'est par pur hasard qu'il observa qu'une modification minimale des données initiales pouvait changer de manière considérable ses résultats. Lorenz venait de découvrir le phénomène de *sensibilité aux conditions initiales*. Les systèmes répondant à cette propriété seront à partir de 1975 dénommés : systèmes chaotiques. C'est donc au cours des années 70 que la théorie du chaos a pris son essor [21]. Depuis, La théorie du chaos a des applications en météorologie, sociologie, physique, informatique, ingénierie, économie, biologie et philosophie [22-26].

4.2.2. Propriétés des systèmes chaotiques [27][28]

Il est très délicat de définir ce qu'est un système chaotique, étant donné qu'il n'existe pas une définition précise. En pratique, on peut dire qu'un système chaotique a un comportement borné en régime permanent, qui ne correspond pas à un point d'équilibre, qu'il n'est ni périodique, ni quasi-périodique.

Parmi les caractéristiques principales permettant d'évoquer un comportement chaotique, on peut retenir les trois suivantes :

- ✓ un système chaotique est un système déterministe ,
- ✓ il exhibe une extrême sensibilité aux conditions initiales (SCI) ,
- ✓ il présente un comportement asymptotique apériodique.

4.2.2.1. Sensibilité aux conditions initiales

Tout d'abord, les systèmes chaotiques sont extrêmement sensibles aux perturbations. L'évolution d'un système dynamique chaotique est imprédictible en ce sens qu'elle est sensible aux conditions initiales. Ainsi, deux trajectoires de phases initialement voisines s'écartent toujours l'une de l'autre, et ceci quelle que soit leur proximité initiale. Il est en particulier clair que la moindre erreur ou simple imprécision sur la condition initiale interdit de décider à tout temps quelle sera la trajectoire effectivement suivie et, en conséquence, de faire une prédiction autre que statistique sur le devenir à long terme du système.

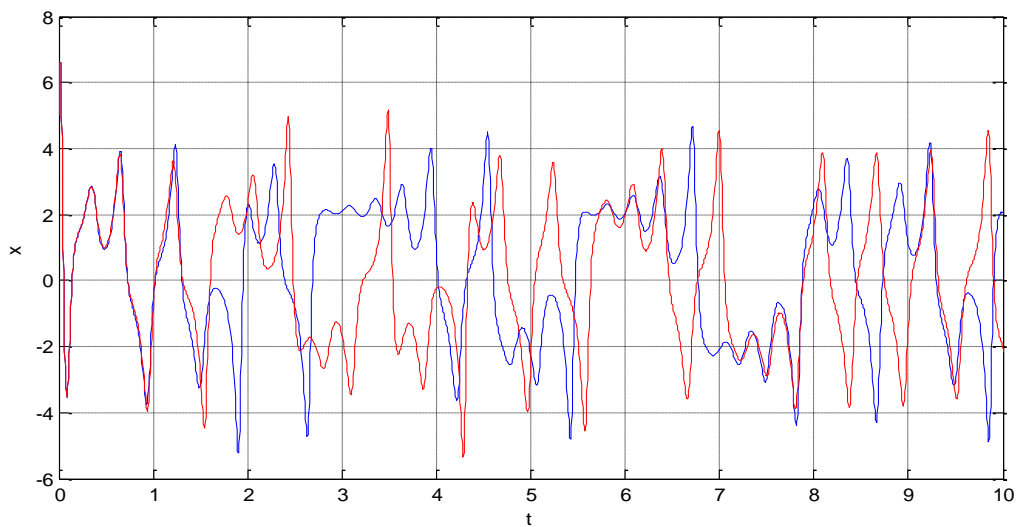


Figure 4.1 Evolution dans le temps pour deux conditions initiales très proches.

4.2.2. 2. Aspect aléatoire

Les courbes de la Figure (4.1) illustrent la sensibilité aux conditions initiales. Cependant, une autre caractéristique des systèmes chaotiques peut être observée sur les courbes précédentes. En effet, un système chaotique évolue d'une manière qui semble aléatoire. La courbe de la Figure (4.2) permet de comparer une évolution simple, périodique et donc prédictible d'un système classique avec l'évolution plus complexe, non périodique et non prédictible d'un système chaotique. Ainsi, les systèmes chaotiques

semblent évoluer de manière aléatoire. En tout cas, on ne peut prévoir facilement quelle sera leur évolution dans le temps. Notons que les systèmes chaotiques obéissent tout de même aux lois de la physique. Si on se place dans l'approximation de la physique classique, on peut affirmer que le système est totalement déterministe [2].

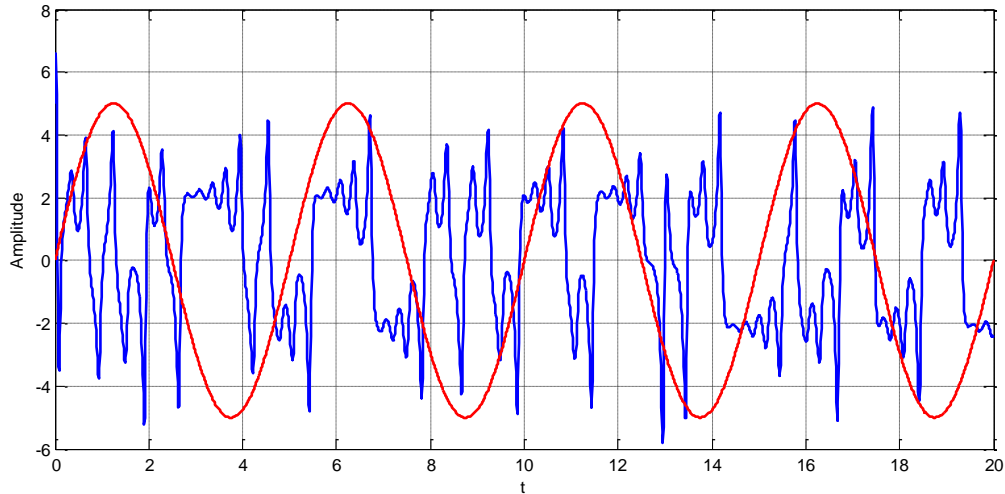


Figure 4.2 Evolution dans le temps d'un système chaotique, comparé à une sinusoïde.

4.2.2.3. Systèmes chaotiques et méthode de Lyapounov :

Les exposants de Lyapounov mesurent le taux de divergence des orbites voisines et Lyapounov a démontré qu'il y avait en fait autant d'exposants qu'il n'y avait de dimensions dans l'espace de phase du système étudié. Par ailleurs, parmi les exposants retenus pour un système donné, on a l'habitude de prendre généralement l'exposant le plus élevé.

D'une manière générale, Lyapounov part de la formule suivante :

$$\left| \frac{E_n}{E_0} \right| = \left| \frac{E_n}{E_{n-1}} \right| \left| \frac{E_{n-1}}{E_{n-2}} \right| \dots \left| \frac{E_1}{E_0} \right| \quad \text{D'où} \quad \frac{1}{n} \ln \left| \frac{E_n}{E_0} \right| = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{E_k}{E_{k-1}} \right| \quad (4.1)$$

Le terme $\left| \frac{E_k}{E_{k-1}} \right|$ décrit en fait combien une petite erreur E_k en x_k , soit la $k^{\text{ième}}$

itération, est augmentée ou diminuée dans l'itération suivante. L'amplification est d'ailleurs dépendante de la taille de l'erreur. Lyapounov a découvert ensuite que cette erreur tendait vers une limite dont la formule est la suivante :

$$\lambda(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln |f'(x_{k-1})| \quad (4.2)$$

Si $\lambda < 0$: l'orbite est attractive vers un point fixe ou une orbite périodique stable. Il caractérise les systèmes dissipatifs. Ce type de système exhibe une stabilité asymptotique ; de plus l'exposant est négatif, plus la stabilité est grande. Les points fixes et points périodiques super stables ont un exposant de Lyapounov λ qui tend vers $-\infty$.

Si $\lambda = 0$: l'orbite est un point fixe neutre. Un système physique avec un tel exposant est dit conservateur. Dans cette situation, les orbites gardent une séparation constante.

Si $\lambda > 0$: l'orbite est instable et chaotique. Tous les points voisins vont être visités. Ces points sont dits instables. Pour un système discret, on a un ensemble de points avec aucun rapport de liaison. Pour un système continu, l'espace de phase est un ensemble de lignes croisées.

Dans le tableau suivant nous allons présenter la classification des régimes permanents en fonction du spectre Lyapounov [22] :

Régime permanent	Attracteur	Spectre	Exposants Lyapounov
point d'équilibre	point	Composante continue	$0 > \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_n$
périodique	Courbe fermée	Fréq. Fondamentale +harmoniques entières	$\lambda_1 = 0$ $0 > \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$
Quasi-périodique	tore	Composantes fréquentielles en rapport irrationnel	$\lambda_1 = \dots = \lambda_i = 0$ $0 > \lambda_{i+1} \geq \dots \geq \lambda_n$
chaotique	fractale	Spectre large	$\lambda_1 > 0$ $0 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$

Tableau 4.1 Classification des régimes permanents en fonction du spectre Lyapounov

4.3. La commande prédictive à retour d'état :

4.3.1. La théorie de la commande prédictive à retour d'état

Considérons la classe des systèmes non linéaires décrits par l'équation dynamique :

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + u(t) \quad x(t_0) = x_0 \quad (4.3)$$

Où $x \in R^n$ représente l'état du système, $u \in R^n$ la commande et $f : R^n \times R^+ \rightarrow R^n$ est une fonction continue non-linéaire.

L'objectif de la commande prédictive à retour d'état est d'assurer que le système converge asymptotiquement vers un point fixe stable ou une orbite périodique instable x_f

Définition :

On appelle point fixe ou point d'équilibre du système (4.3), le point x_f tel que :

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = f(x_f) = 0, \quad (4.4)$$

Dans le cadre de la commande prédictive, la forme de la commande $u(t)$ est choisi tel que proposé par Boukabou et al [16-19][29] :

$$u(t) = K(\dot{x}_p(t) - x(t)) \quad (4.5)$$

Où : K représente le gain.

$x(t)$ Représente l'état actuel du système et $x_p(t)$ représente l'état prédit.

En utilisant une prédiction d'un pas en avant, on obtient [16-19][29] :

$$u(t) = K(\dot{x}(t) - x(t)) \quad (4.6)$$

la linéarisation autour de ce point revient à prendre la formule suivante : $x = x_f + \delta x$

Par dérivation

$$\dot{x} = \dot{x}_f + \delta \dot{x} \quad (4.7)$$

En remplaçant dans (4.4), on obtient :

$$\dot{x}_f + \delta \dot{x} = f(x_f + \delta x) \quad (4.8)$$

Et, par développement de Taylor du premier ordre de $f(x)$, on obtient :

$$f(x_f + \delta x) = f(x_f) + f'(x_f) * (x - x_f) \quad (4.9)$$

Remplaçant dans (4.8)

$$\dot{x}_f + \delta \dot{x} = f(x_f) + f'(x_f)(x - x_f) \quad (4.10)$$

D'après la définition du point fixe :

$$\dot{x} = f(x_f) = 0 \quad (4.11)$$

On en déduit :

$$\delta\dot{x} = f'(x_f) * (x - x_f) \quad (4.12)$$

De (4.7) on a :

$$\delta x = x - x_f \quad (4.13)$$

D'où la forme générale :

$$\delta\dot{x} = Df(x_f) * \delta x \quad (4.14)$$

Où DF représente la matrice jacobienne de $f(X)$ par rapport à x , tel que :

$$DF = \left\{ \frac{df_i}{dx_j} \right\}, i=1,2,\dots,N \quad j=1,2,\dots,N \quad (4.15)$$

En linéarisant le système précédent, on obtient :

$$\begin{aligned} \delta\dot{x}(t) &= Df(x_f)\delta x(t) + \delta u(t) \\ \delta\dot{x}(t) &= Df(x_f)\delta x(t) + K(\delta\dot{x}(t) - \delta x(t)) \\ \delta\dot{x}(t) &= Df(x_f)\delta x(t) + K(Df(x_f)\delta x(t) - \delta x(t)) \\ \delta\dot{x}(t) &= Df(x_f)\delta x(t) + K * Df(x_f)\delta x(t) - K\delta x(t) \\ \delta\dot{x}(t) &= (Df(x_f) + K(Df(x_f) - I))\delta x(t) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Les références [16-19] supposent que le gain K est un constant dans un interval, par contre dans notre travail, on le suppose sous forme d'une matrice, qu'il faut la calculer à partir des LMIs, pour cela on propose le théorème suivant :

Théorème : le système (4.3) est asymptotiquement stable sous la commande $u(t) = [YX^{-1}]^T(\dot{x}(t) - x(t))$, si et seulement s'il existe une matrice symétrique définie positive $X = X^T = P > 0$ et une matrice Y pour n'importe quelle matrice symétrique $Q = Q^T > 0$, vérifiant l'inégalité :

$$\begin{vmatrix} Df(x_f)^T X + Df(x_f)^T Y - Y + X \cdot Df(x_f) + Y^T \cdot Df(x_f) - Y^T & I \\ I & -Q^{-1} \end{vmatrix} < 0 \quad (4.17)$$

Démonstration du théorème :

On considère la fonction de Lyapunov : $V(x(t)) = x^T(t)Px(t)$

Où $P = P^T > 0$

$$\begin{aligned}
\dot{V}(x(t)) &= \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) \\
&= x(t)^T (Df(x_f))^T P + Df(x_f)^T [YX^{-1}]P - [YX^{-1}]P)x(t) \\
&\quad + x(t)^T (P \cdot Df(x_f) + P \cdot [YX^{-1}]^T \cdot Df(x_f) - P \cdot [YX^{-1}]^T)x(t) \\
&= x(t)^T (Df(x_f))^T P + Df(x_f)^T [YX^{-1}]P - [YX^{-1}]P + P \cdot Df(x_f) + \\
&\quad P \cdot [YX^{-1}]^T \cdot Df(x_f) - P \cdot [YX^{-1}]^T)x(t)
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Si la LMI suivante est vérifiée :

$$Df(x_f)^T P + Df(x_f)^T [YX^{-1}]P - [YX^{-1}]P + P \cdot Df(x_f) + P \cdot [YX^{-1}]^T \cdot Df(x_f) - P \cdot [YX^{-1}]^T + Q < 0 \tag{4.19}$$

Alors $\dot{V}(x(t)) < -x(t)^T Qx(t) < 0$, alors le système est asymptotiquement stable.

Lemme 1: Complément de Schur [30]

Soit une matrice symétrique $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix} < 0$, avec S_{ij} ($i, j = 1, 2$) a des dimensions

appropriées, les inégalités suivantes sont équivalentes :

$$S < 0.$$

$$S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0.$$

$$S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0.$$

A partir du complément de Schur, et en introduisant un changement de variable comme suit : $X = P$ et $Y = K^T P$ L'inégalité matricielle (4.19) devienne :

$$\begin{vmatrix} Df(x_f)^T X + Df(x_f)^T Y - Y + X \cdot Df(x_f) + Y^T \cdot Df(x_f) - Y^T & I \\ I & -Q^{-1} \end{vmatrix} < 0 \tag{4.20}$$

Ce qui confirme le théorème.

4.4. Application de la commande prédictive à retour d'état pour le contrôle des éoliennes à comportement chaotique suite aux défauts dans leurs moteurs

4.4.1. Modélisation mathématique des générateurs à comportement chaotique dû aux défauts des composants

De l'équations (3.11), on a :

$$\begin{cases} \frac{d\omega_r}{dt'} = \frac{p}{J} (\phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) - \frac{f}{J} \omega_r - \frac{T}{J} \\ \frac{di_q}{dt'} = -\frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{p \phi_f}{L_q} \omega_r + \frac{u_q}{L_d} \\ \frac{di_d}{dt'} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q + \frac{u_d}{L_d} \end{cases} \quad (4.21)$$

En appliquant une transformation affinée et une transformation de mise à l'échelle du temps, l'équation (4.21) devienne [26] :

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\omega}_r}{d\tilde{t}} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}_r) + \varepsilon \tilde{i}_d \tilde{i}_q - \tilde{T} \\ \frac{d\tilde{i}_q}{d\tilde{t}} = -\tilde{i}_q - \tilde{\omega}_r \tilde{i}_d + \gamma \tilde{\omega}_r + \tilde{u}_q \\ \frac{d\tilde{i}_d}{d\tilde{t}} = -\tilde{i}_d + \tilde{\omega}_r \tilde{i}_q + \tilde{u}_d \end{cases} \quad (4.22)$$

$$\text{Ou : } \varepsilon = \frac{pbL_q^2 k^2 (Lq - Ld)}{JR_s^2} ; \quad \gamma = -\frac{\phi_f}{kL_q} ; \quad \sigma = \frac{fL_q}{R_s J} ; \quad b = \frac{L_q}{L_d} ; \quad k = \frac{fR}{L_q p \phi_f}$$

$$\tilde{i}_d = \frac{L_d p \phi_f}{f R_s} i_d ; \quad \tilde{i}_q = \frac{L_q p \phi_f}{f R_s} i_q ; \quad \tilde{\omega}_r = \frac{L_q}{R_s} \omega ; \quad \tilde{u}_d = \frac{1}{R_s k} u_d ; \quad \tilde{u}_q = \frac{1}{R_s k} u_q ; \quad \tilde{T} = \frac{L_q^2}{JR_s^2} T$$

Et le temps est redéfini comme suit :

$$\tilde{t} = \frac{R_s t}{L_q} \quad (4.23)$$

Le vecteur x est le vecteur d'état qui prend la forme $x = [\tilde{\omega}_r \tilde{i}_q \tilde{i}_d]^T$, et le modèle ci-dessus le modèle de l'équation (4.22) peut être transformé sous forme du modèle GSAP normalisé suivant:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \sigma(x_2 - x_1) + \tilde{T} + \varepsilon x_3 x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_2 - x_1 x_3 + \gamma x_1 + \tilde{u}_q \\ \dot{x}_3 = -x_3 + x_1 x_2 + \tilde{u}_d \end{cases} \quad (4.24)$$

Nous supposons qu'après une certaine durée de fonctionnement toutes les sollicitations extérieures s'annulent $\tilde{T} = \tilde{u}_q = \tilde{u}_d = 0$ et le système passe en régime autonome ; nous aurons dans ce cas [2] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \sigma(x_2 - x_1) \\ \dot{x}_2 = -x_2 - x_1x_3 + \gamma x_1 \\ \dot{x}_3 = -x_3 + x_1x_2 \end{cases} \quad (4.25)$$

L'étude du système (4.25) indique un comportement chaotique pour des valeurs spécifiques des paramètres γ et σ . Lorsque les paramètres de fonctionnement du système prend les valeurs suivantes: $\sigma = 5.45$, $\gamma = 20$, la GSAP affiche un comportement chaotique [2] comme on le voit sur la figure (4.3).

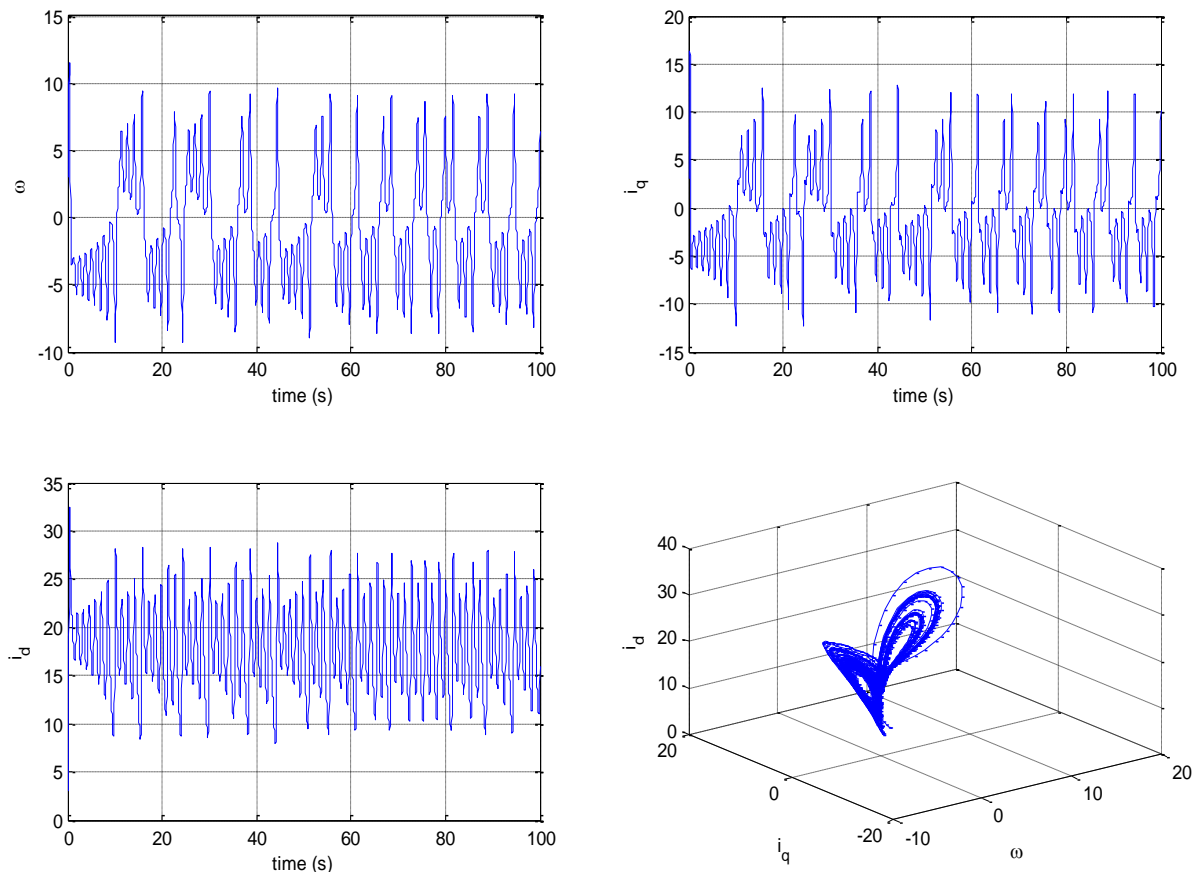


Figure 4.3 Évolution des variables d'état de la GSAP chaotique sans contrôle et l'attracteur chaotique typique avec les paramètres du système $\sigma = 5.45$, $\gamma = 20$.

Dans cette partie, on va appliquer la commande prédictive- LMI pour le contrôle de la GASP chaotique. Afin de démontrer et de vérifier les performances de la méthode proposée ; Les simulation sont réalisées sur une éolienne de 300Kw sous simulink avec une condition initiale de $(3,3,3)^T$. On décompose l'équation (4.25) en deux parties ; partie linéaires et partie non linéaires du système GSAP, ce qui nous permis de récrire le système comme suit :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + f(x(t)) \quad (4.26)$$

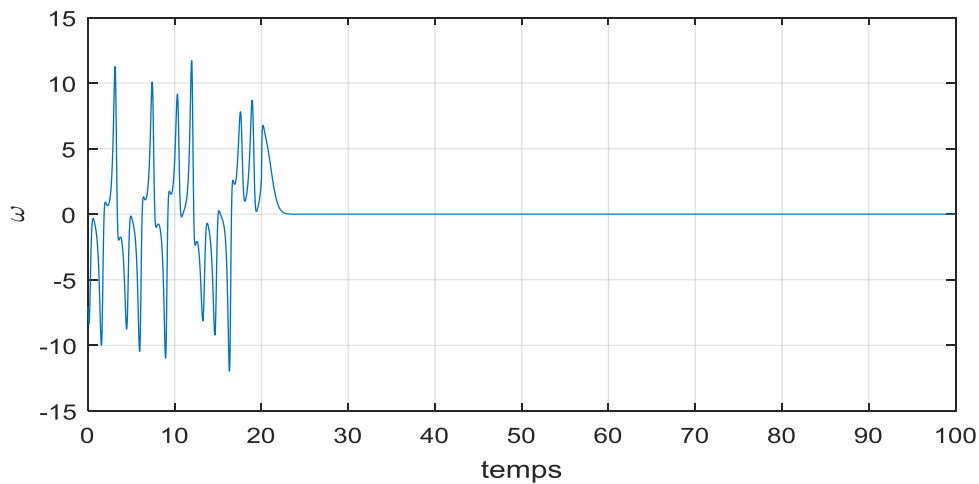
$$\text{ou : } x(t) = (x_1, x_2, x_3)^T, A = DF(x_f) = \begin{bmatrix} -5.45 & 5.45 & 0 \\ 20 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ and } f(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ -x_1x_3 \\ x_1x_2 \end{bmatrix}$$

Nous contrôlons le système GSAP vers son point d'équilibre $(0,0,0)^T$, pour cela, nous appliquant la commande $u(t)$ proposée dans le théorème défini comme suit :

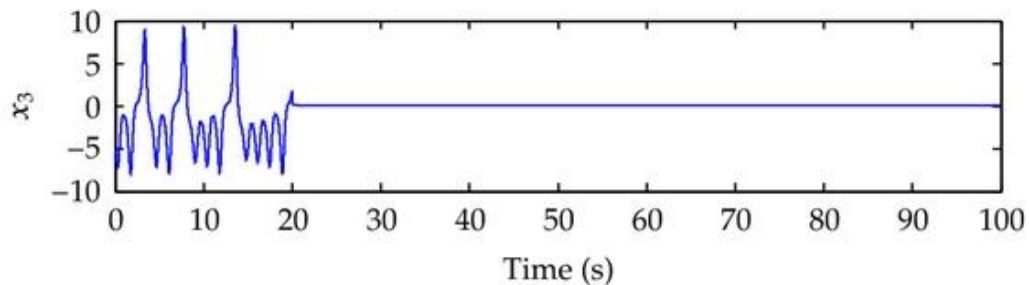
$$u(t) = [YX^{-1}]^T (\dot{x} - x) = [YX^{-1}]^T \begin{bmatrix} \dot{x}_1 - x_1 \\ \dot{x}_2 - x_2 \\ \dot{x}_3 - x_3 \end{bmatrix}. \text{ Le gain de retour est déterminé en résolvant les}$$

LMI (4.17) avec Matlab. En utilisant Matlab 7.9, on obtient

$$X = \begin{bmatrix} 36.2244 & 0 & 0 \\ 0 & 36.2244 & 0 \\ 0 & 0 & 36.2244 \end{bmatrix} \text{ et } Y = \begin{bmatrix} -65.4394 & 3.9956 & 0 \\ -12.9176 & 369.4997 & 0 \\ 0 & 0 & -0.7317 \end{bmatrix}.$$

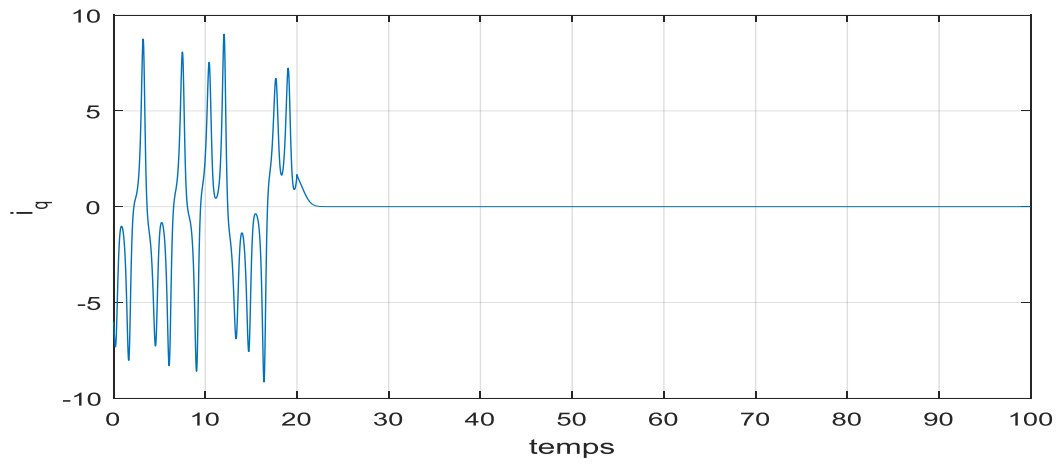


-a-

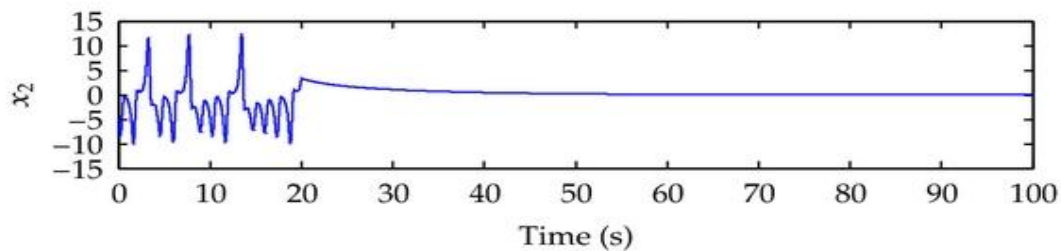


-b-

Figure 4.4 Vitesse de rotation de le GSAP chaotique contrôlé au point d'équilibre, avec un contrôleur activé à $t = 20s$ a) avec contrôleur prédictif-LMI b) la commande « Fuzzy Guaranteed Cost Controller » [27]



-a-



-b-

Figure 4.5 Courant i_q de le GSAP chaotique contrôlé au point d'équilibre, avec un contrôleur activé à $t = 20s$ a) avec contrôleur prédictif -LMI b) la commande « Fuzzy Guaranteed Cost Controller » [27]

Comme nous pouvons voir sur les figures (4.4 , 4.5 et 4.6) qui représentent respectivement , la vitesse mécanique de la GSAP et les courants ,lorsque on active la commande prédictive à partir de $t = 20s$, la commande les stabilise efficacement.

Il est montré que les deux méthodes ont d'excellentes performances, mais en comparant les résultats des deux contrôleurs, il est clair que la commande prédictive est meilleure que la commande Fuzzy Guaranteed Cost [27] vu quelle stabilise le système au moins de 5 s, ainsi qu'elle soit plus souple et moins complexe.

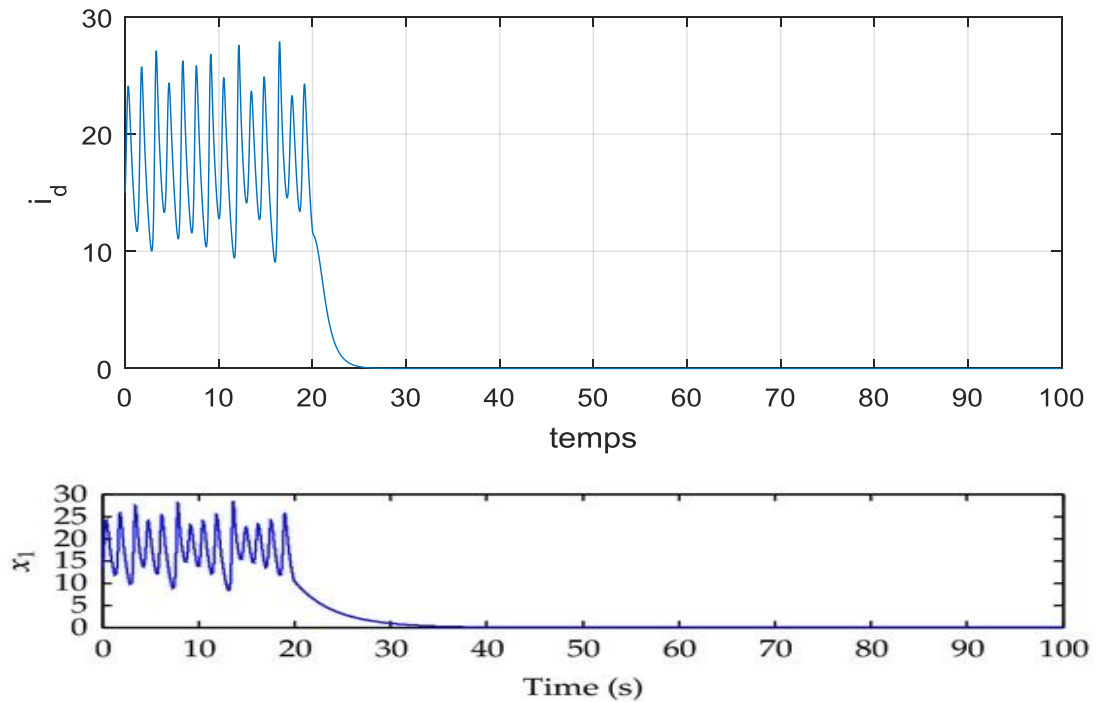


Figure 4.6 Courant i_d de la GSAP chaotique contrôlé au point d'équilibre, avec un contrôleur activé à $t = 20s$ a) avec contrôleur prédictif-LMI b) la commande « Fuzzy Guaranteed Cost Controller » [27]

Dans la partie suivante, nous nous intéresserons à l'optimisation et à la commande d'une éolienne équipée d'une GSAP qui a un comportement chaotique. Nous utiliserons les algorithmes génétiques pour évaluer les valeurs optimums de l'angle d'inclinaison β_{opt} le rapport de la vitesse spécifique λ_{opt} et $\omega_{r_{opt}}$ afin de maximiser la valeur du coefficient de puissance $C_{p_{max}}$ et d'extraire le maximum de puissance.

Pour les algorithmes génétiques, nous suivons les étapes suivantes :

ETAPE 1

- On fixe les valeurs maximales et minimales de chaque paramètre de (β et λ)
- On fixe le nombre de bit de codage de chaque paramètre de (β et λ).
- On fixe la probabilité de mutation, de croisement, le nombre de génération maximal ainsi que la taille de la population.

ETAPE 2 :

à chaque instant d'échantillonnage t (t non nul).

- On recueille la valeur de C_p
- Codage binaire des paramètres.

- Génération aléatoire de la première population
- Décodage des paramètres.
- Calcul du critère J.
- Calcul de la fitness

ETAPE 3 :

Tant que le nombre de génération n'est pas atteint :

- Application des opérateurs génétiques (reproduction, croisement mutation).
- Décodage des paramètres
- Calcul du critère J.
- Calcul de la fitness

ETAPE 4

- De la dernière génération on prend l'individu qui a la meilleure fonction d'adaptation, alors les meilleurs paramètres estimés de (β^* et λ^*)

Le mécanisme est répété à chaque échantillon, à partir de l'étape 2 jusqu'à l'étape 4.

Le profil du vent est choisi d'une façon aléatoire compris entre 4m/s et 15m/s de telle façon d'avoir les trois modes de fonctionnement de l'éolienne comme indiqué sur la figure (4.7).

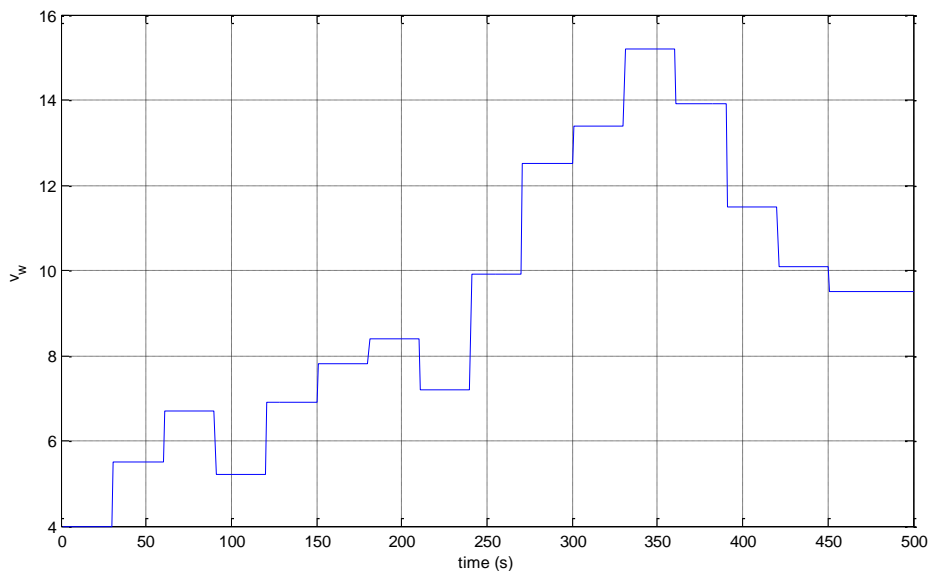


Figure 4.7 Profil du vent.

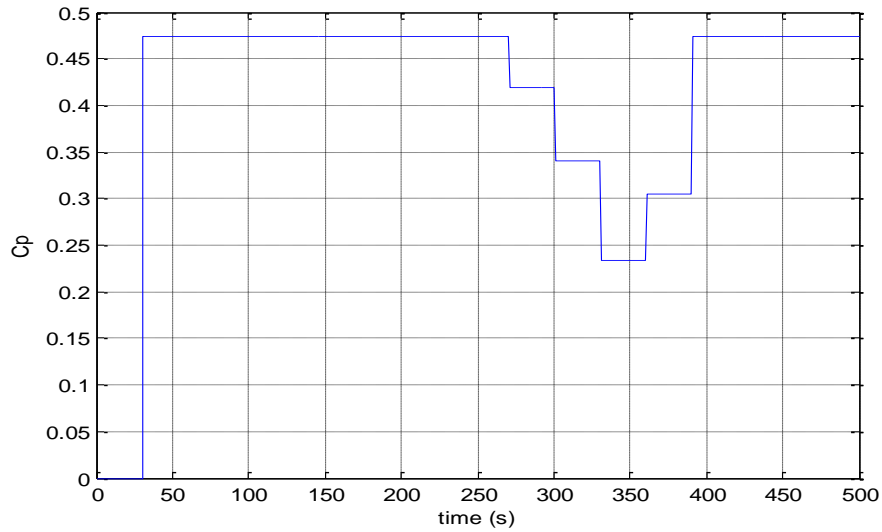
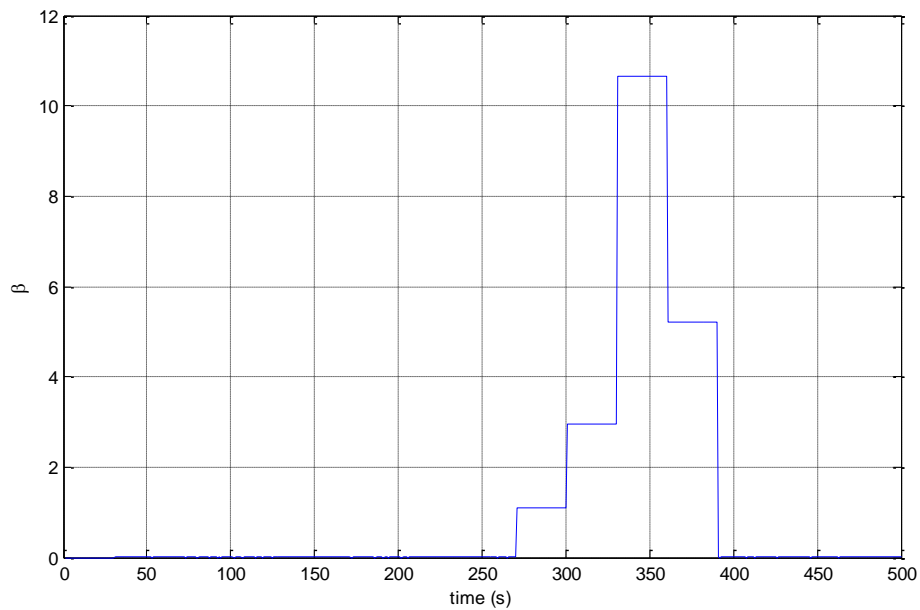
Figure 4.8 Valeur optimale de coefficient de puissance C_p avec les AG.

Figure 4.9 Angle d'inclinaison des pales optimisées avec les AG.

Les figures (4.8, 4.9, 4.10) représentent respectivement les valeurs optimales du : coefficient de puissance, l'angle d'inclinaison de la pale et le rapport de la vitesse spécifique. Comme on le voit sur les figures, pour des valeurs du vent inférieures à 12 m/s le coefficient de C_p prend une valeur maximale et l'angle de d'inclinaison β est nul, par contre, si la vitesse du vent excède les 12 m/s l'angle de calage β augmente afin de

maintenir constante la puissance électrique générée et la valeur du coefficient de puissance C_p diminue.

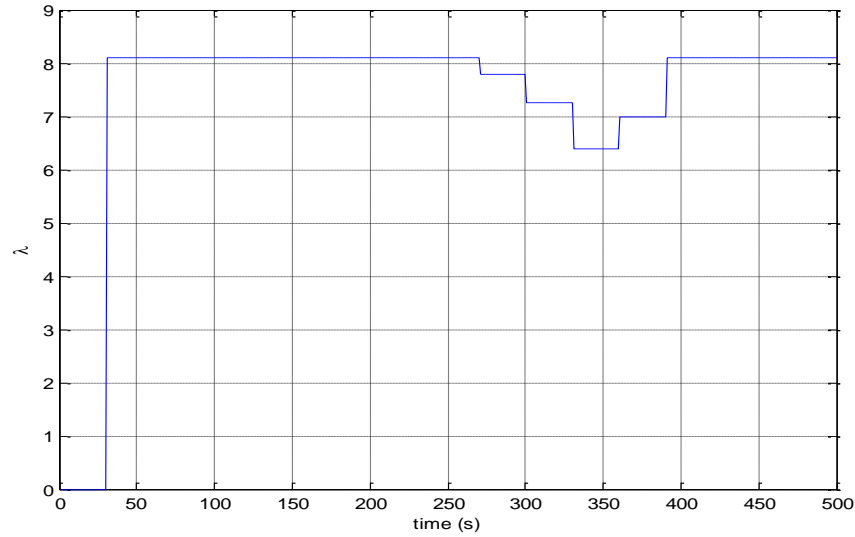


Figure 4.10 Rapport de la vitesse spécifique de la turbine optimisé par les AG

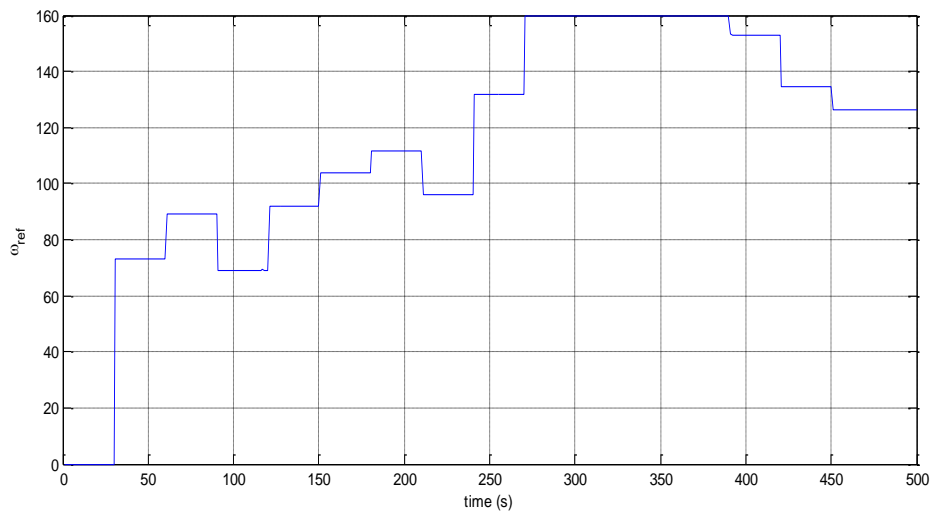


Figure 4.11 Vitesse de rotation de la GSAP de référence.

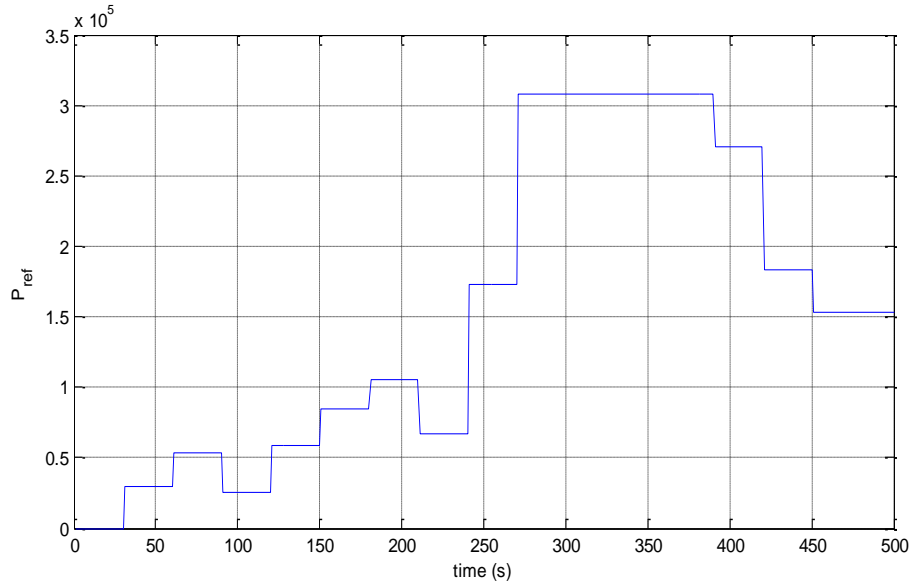


Figure 4.12 Puissance électrique produite optimisé par les AG.

La figure (4.11), représente les valeurs optimales de la vitesse de rotation de la GSAP et la figure (4.12) la puissance électrique produite par le vent. Nous pouvons voir que pour des vitesses du vent supérieur à 12 m/s la puissance de l'éolienne reste constante suite à l'ouverture de l'angle d'inclinaison de la pale.

Dans cette partie, nous illustrons l'efficacité de la stratégie de la commande prédictive ; nous allons l'appliquer sur le système d'énergie éolienne basée sur une Machine GSAP chaotique suite à une défaillance et on va essayer de la contrôler vers des valeurs de référence afin d'extraire le maximum de la puissance.

Afin d'imposer que la commande oblige le système à suivre des trajectoires de référence, nous allons introduire une entrée externe dans l'équation (4.17), et devient comme suit :

$$u(t) = [YX^{-1}]^T (\dot{x}(t) - x(t)) + \eta \quad (4.27)$$

L'objectif est de contrôler la GSAP chaotique vers les points $[\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3]$. A partir de l'équation (4.25), on a :

$$\eta = -(56.6294x_1 + \frac{0.0206}{x_1} + 25.2208(\sigma(x_1 - \frac{0.0206}{x_1}))) \quad (4.29)$$

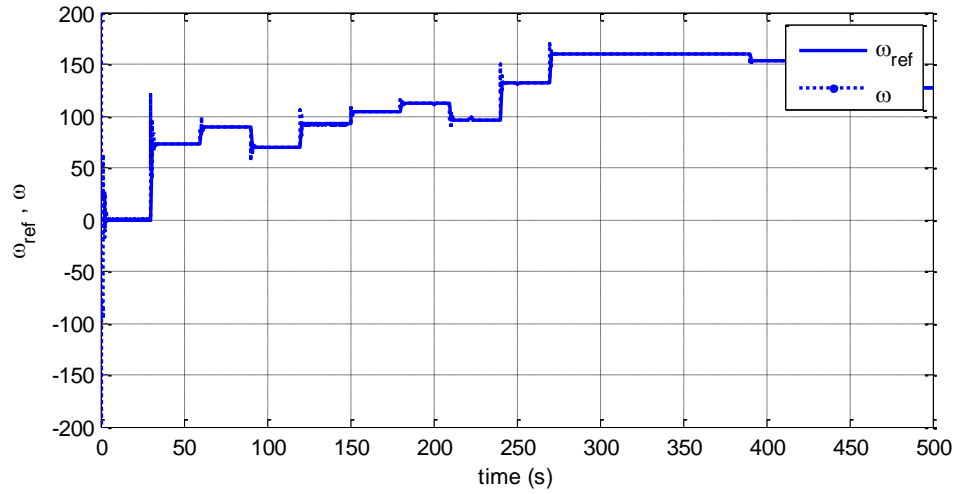


Figure 4.13 Vitesse de rotation contrôler par la commande predictive.

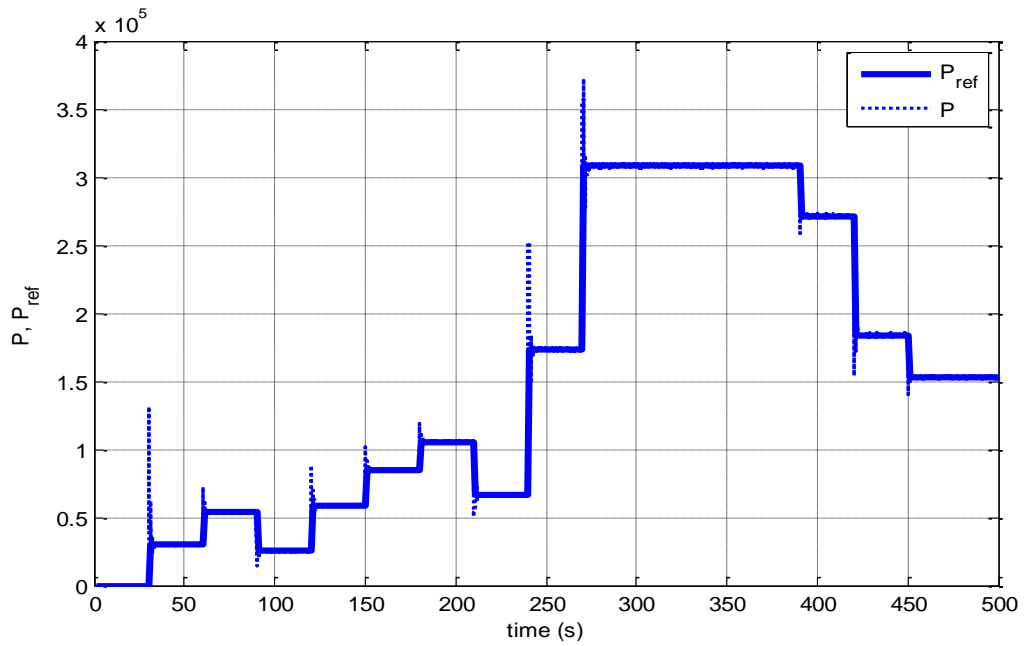


Figure 4.14 Puissance de l'éolienne contrôlée par la commande predictive

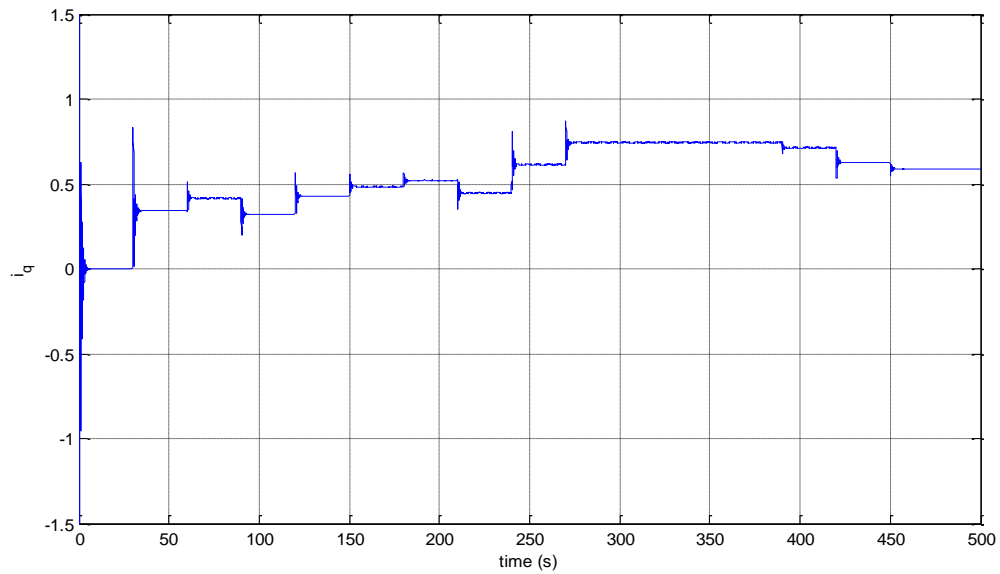


Figure 4.15 Courant I_q contrôlé par la commande prédictive.

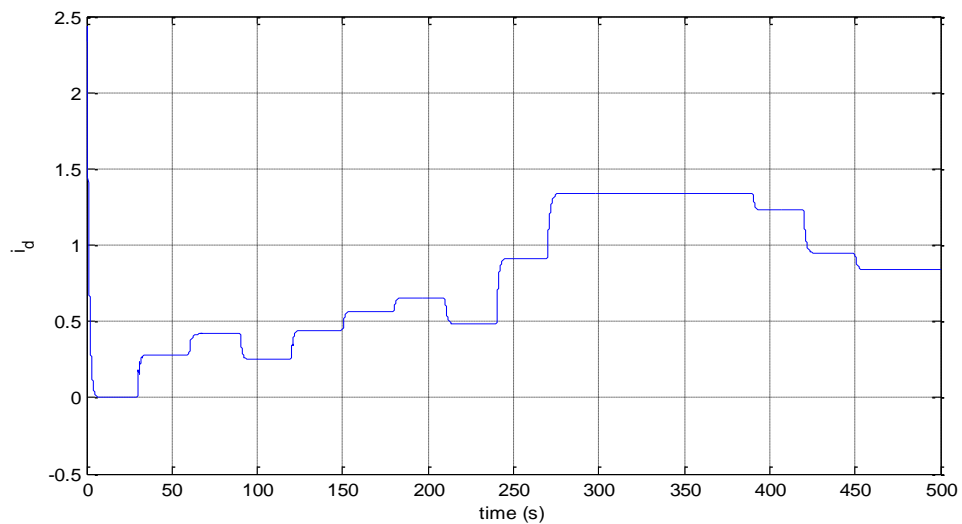


Figure 4.16 Courant I_d contrôlé par la commande prédictive.

D'après les figures (4.14 ; 4.15, 4.16), nous pouvons constater que la GSAP poursuit la référence imposée et l'éolienne génère la puissance désirée.

4.2.2. Modélisation mathématique des générateurs à comportement chaotique dû aux défauts de la commande

Le modèle dynamique non linéaire d'une GSAP exprimé par rapport à un repère de référence (d,q) synchrone avec la rotation du moteur est donné par les équations suivantes [31] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\phi}_{qr} = -\frac{R_r}{L_r} \phi_{qr} - \omega_{sl} \phi_{dr} + \frac{L_m}{L_r} R_r i_{qs} \\ \dot{\phi}_{dr} = -\frac{R_r}{L_r} \phi_{dr} - \omega_{sl} \phi_{qr} + \frac{L_m}{L_r} R_r i_{ds} \\ \dot{\omega}_r = -\frac{R_\omega}{J} \omega_r + \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} n_p (i_{qs} \phi_{dr} - i_{ds} \phi_{qr}) - T_L \right] \end{array} \right. \quad (4.29)$$

avec $c_1 = \frac{R_r}{L_r}$, $c_2 = \frac{L_m}{L_r} R_r$, $c_3 = \frac{R_\omega}{J}$, $c_4 = \frac{1}{J}$, $c_5 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} n_p$, $x_1 = \phi_{qr}$; $x_2 = \phi_{dr}$,

$u_1 = \omega_{sl}$, $u_2 = i_{ds}$, $u_3 = i_{qs}$

Le modèle dynamique non linéaire de la GSAP avec le champ indirect contrôlé peut être réécrit comme suit [31] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = -c_1 x_1 - u_1 x_2 + c_2 u_3 \\ \dot{x}_2 = -c_1 x_2 - u_1 x_1 + c_2 u_2 \\ \dot{\omega}_r = -c_3 \omega_r + c_4 [c_5 (x_2 u_3 - x_1 u_2) - T_L] \end{array} \right. \quad (4.30)$$

Généralement, le contrôle orienté champ indirect est généralement appliqué avec un Correcteur *proportionnel* intégral (PI) comme suit [32-33] :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = \hat{c}_1 \frac{u_3}{u_2} \\ u_2 = u_2 \\ u_3 = K_p (\omega_{ref} - \omega_r) + K_i \int_0^t (\omega_{ref}(\zeta) - \omega_r(\zeta)) d\zeta \end{array} \right. \quad (4.31)$$

Ou, \hat{c}_1 estimation de la constante de temps rotorique de c_1 , ω_{ref} : vitesse de rotation de référence, u_2^0 : valeur du flux de référence rotorique, K_p : gain de proportionnalité
 K_i : gain d'intégration.

En utilisant la commande vectorielle, et on posant : $K = \frac{\hat{c}_1}{c_1}$; $x_3 = \omega_{ref} - \omega_r$ et $x_4 = u_3$,

on obtient [31] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -c_1 x_1 + c_2 x_4 - \frac{kc_1}{u_2} x_2 x_4 \\ \dot{x}_2 = -c_1 x_2 + c_2 u_2^0 + \frac{kc_1}{u_2^0} x_1 x_4 \\ \dot{x}_3 = -c_3 x_3 - c_4 [c_5 (x_2 x_4 - x_1 u_2^0) - T_L - \frac{c_3}{c_4} \omega_{ref}] \\ \dot{x}_4 = (k_i - k_p c_3) x_3 - k_p c_4 [c_5 (x_2 x_4 - x_1 u_2^0) - T_L - \frac{c_3}{c_4} \omega_{ref}] \end{cases} \quad (4.32)$$

lorsque $c_1 = 13,67$, $c_2 = 1,56$, $c_3 = 0,59$, $c_4 = 1176$, $c_5 = 2,86$, $u_2^0 = 4$, $k_p = 0,001$, $k_i = 1$, $T_L = 0,5$, $\omega_{ref} = 181,1$ $k = 1,5$, Le moteur génère un comportement chaotique comme on peut le voir sur la figure (4.18).

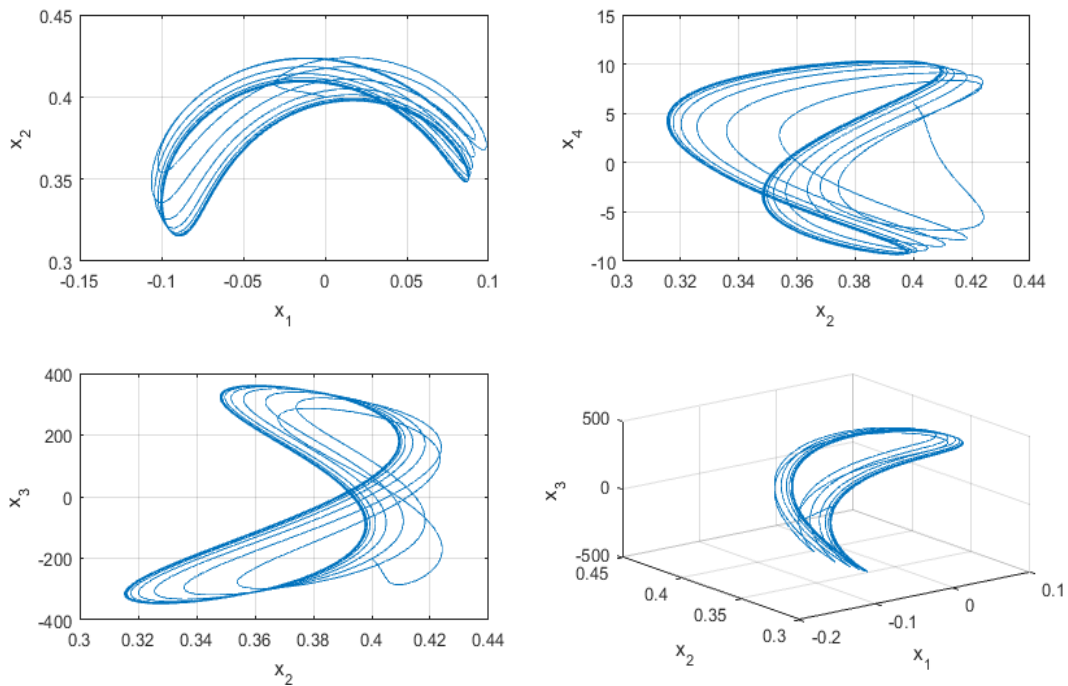


Figure 4.17 Dynamique et l'attracteur du système (4.32)

Pour stabiliser le système (4.32) vers son point fixe, on le réécrit sous la forme :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + f(x(t))$$

$$\text{ou : } x(t) = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T, \quad A = \begin{vmatrix} -13.67 & 0 & 0 & 1.56 \\ 0 & -13.67 & 0 & 0 \\ 13453 & 0 & -0.59 & 0 \\ 13.4534 & 0 & 0.9994 & 0 \end{vmatrix}$$

$$f(x(t)) = \begin{bmatrix} -5.1262x_2x_3 \\ 5.1262x_1x_4 + 6.24 \\ -3363.4x_2x_4 + 694.85 \\ -3.3634x_2x_4 + 0.6948 \end{bmatrix}. \quad \text{le système (4.32) à un seul point d'équilibre qui a}$$

pour valeur : $[0.017 \quad 0.455 \quad 0 \quad 0.304]$. Avant de calculer la matrice de gain K , on doit d'abord calculer la matrice jacobéenne autour du point d'équilibre :

$$DF(x_f) = \begin{bmatrix} -13.67 & 1.558 & 0 & -0.772 \\ 1.558 & -13.67 & 0 & -0.087 \\ 13453.44 & -1022.46 & -0.59 & -1530.32 \\ 13.4534 & -1.022 & 0.999 & -1.530 \end{bmatrix}$$

Après, nous appliquant la commande $u(t)$ proposée dans le théorème (1) et qui est défini comme suit :

$$u(t) = [YX^{-1}]^T (\dot{x} - x) = [YX^{-1}]^T \begin{vmatrix} \dot{x}_1 - x_1 \\ \dot{x}_2 - x_2 \\ \dot{x}_3 - x_3 \\ \dot{x}_4 - x_4 \end{vmatrix}$$

Le gain de retour est déterminé en résolvant les *LMIs* (4.17) avec Matlab.

$$\text{En utilisant Matlab 7.9, on obtient } X = 10^8 \begin{vmatrix} 3.3933 & 0.0354 & 0.0776 & 0.7673 \\ 0.0354 & 4.0404 & 0.0102 & 0.0029 \\ 0.0776 & 0.0102 & 1.3979 & -0.7899 \\ 0.7673 & -0.0279 & 1.9217 & 3.1663 \end{vmatrix}$$

$$\text{et } Y = 10^8 \begin{vmatrix} 0.3586 & -0.0279 & 1.9217 & 3.1663 \\ 0.1351 & 1.7325 & 0.0515 & 0.0309 \\ -0.3620 & 0.0101 & -1.3904 & 0.8236 \\ 0.0575 & 0.0016 & -4.5810 & 0.5144 \end{vmatrix}.$$

Nous avons contrôlé ce système avec la commande passive pour comparer les résultats avec ceux simulés avec le contrôleur LMI- prédictif. Nous n'avons pas détaillé la méthode

passive, puisque ce n'est pas l'objectif de ce travail. Comme on le voit sur les Figures (4.18, 4.19, 4.20 et 4.21), la commande prédictive-LMI stabilise le système plus rapidement que la commande passive. La commande prédictive-LMI stabilise le système en environ 2 secondes, alors que la commande passive est d'environ 6 secondes.

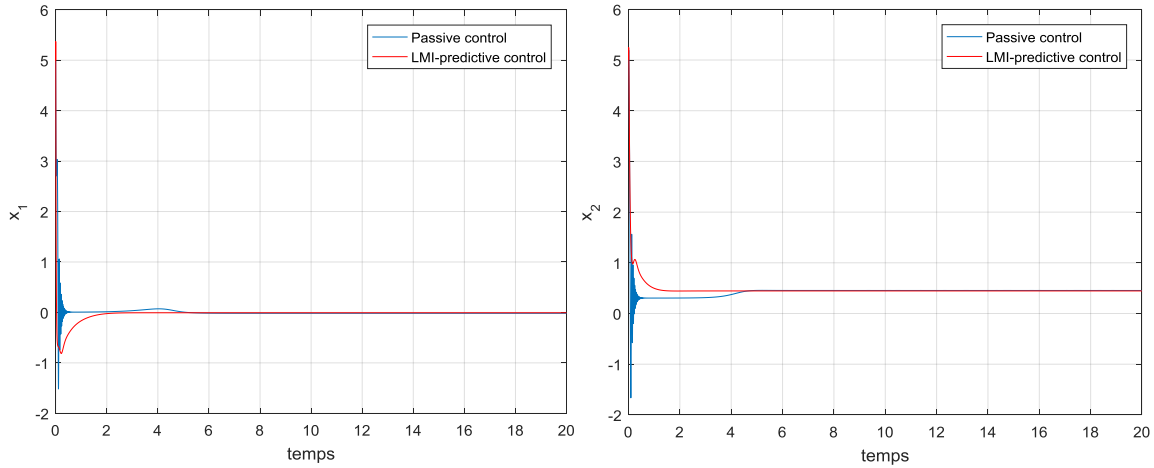


Figure 4.18 Courbe de la réponse temporelle de x_1 Figure 4.19 Courbe de la réponse temporelle de x_2

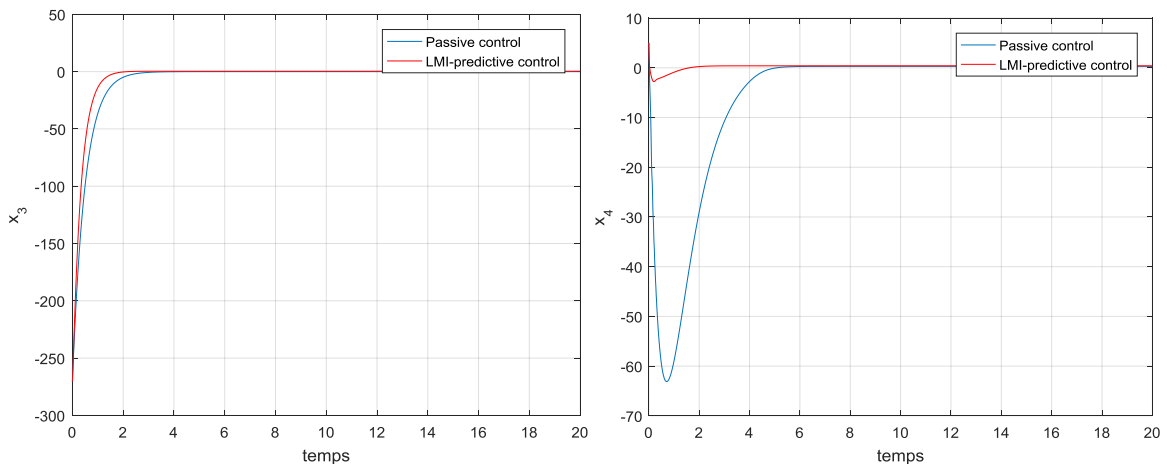


Figure 4.20 Courbe de la réponse temporelle de x_3 Figure 4.21 Courbe de la réponse temporelle de x_4

Afin de démontrer la faisabilité de l'approche proposée, Le circuit du système (4.32) est simulé sous multisim. Le circuit se compose des quatre canaux pour réaliser l'addition, l'intégration et la soustraction des variables d'état x_1, x_2, x_3 et x_4 . Le type d'amplificateur utilisé est le LM741CN et le type du multiplicateur est AD633JN. Le circuit analogique conçu dans le logiciel Multisim est illustré à la Figure (4.22), et les projections expérimentales de l'attracteur chaotique dans le plan $x_1 - x_2$ et le plan $x_2 - x_3$ sont montrées à la Figure (4.23) et Figure (4.24) respectivement.

Comme nous pouvons le voir, nous avons obtenu les mêmes résultats que ceux obtenus par simulation avec Matlab, soit projetés sur le plan $x_1 - x_2$ soit sur le plan $x_2 - x_3$. Le circuit de la commande LMI-prédictive est représenté sur la Figure (4.25) et les états du système chaotique obtenus à partir du circuit réalisé sont représentés sur les figures, (4.26, 4.27, 4.28, 4.29) respectivement. Si ces résultats sont comparés à ceux simulés avec Matlab, nous pouvons facilement montrer que nous avons obtenu les mêmes résultats, ce qui prouve la faisabilité de l'approche proposée.

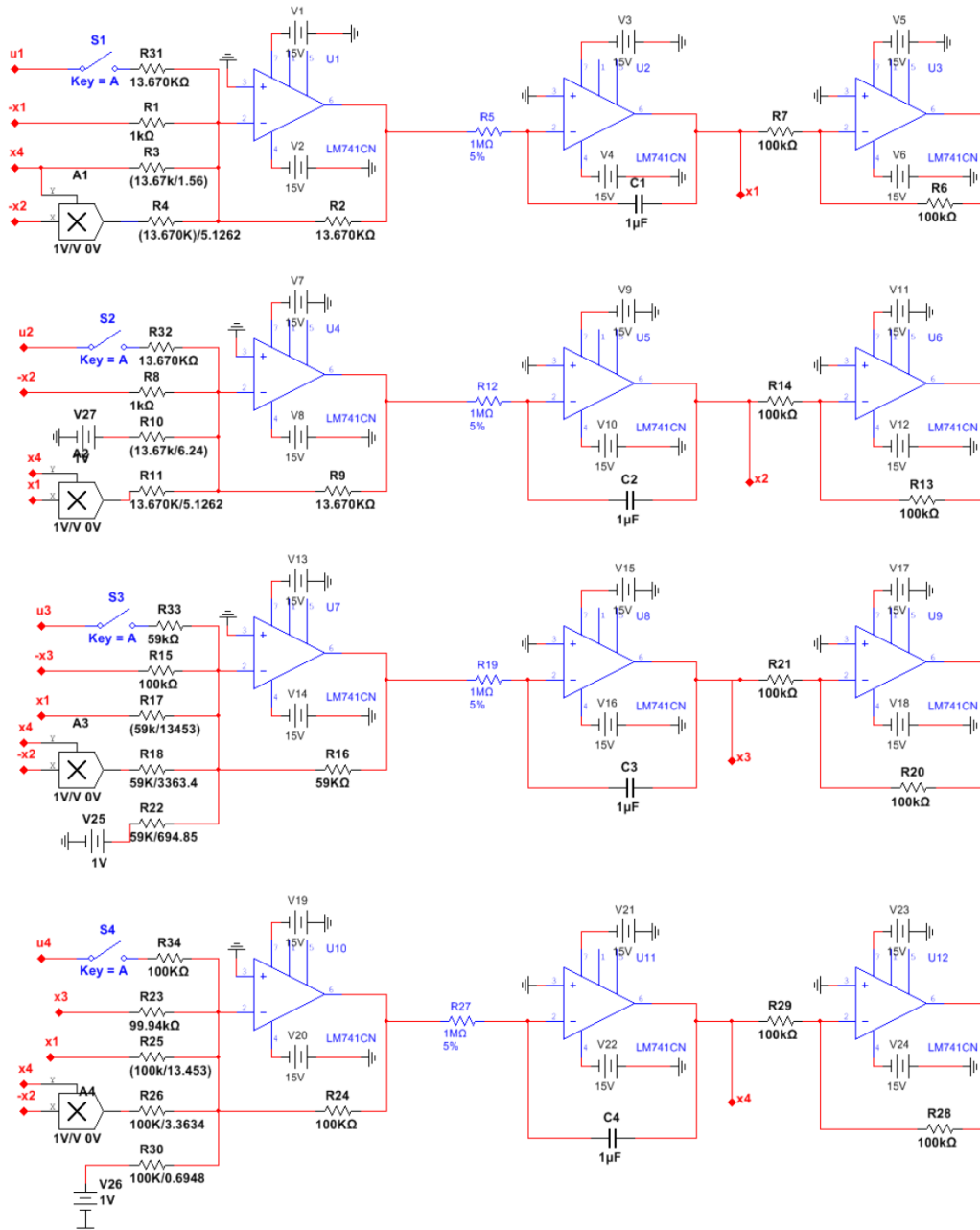


Figure 4.22 Circuit électronique du système chaotique (4.32)

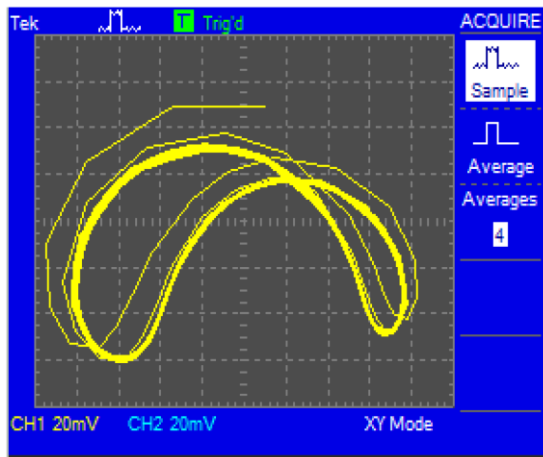


Figure 4.23 Projection expérimentale de l'attracteur chaotique dans Plan $x_1 - x_2$ sans contrôle

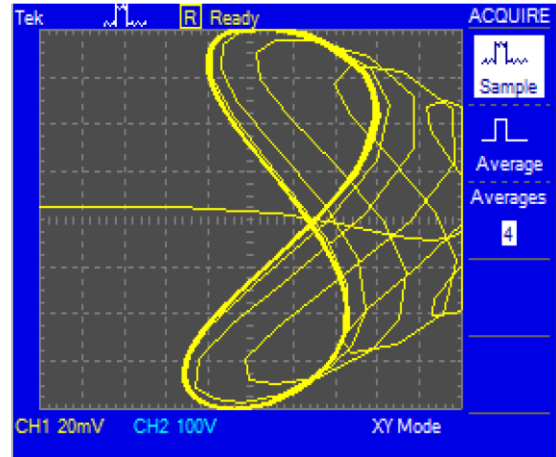


Figure 4.24 Projection expérimentale de l'attracteur chaotique dans Plan $x_2 - x_3$ sans contrôle

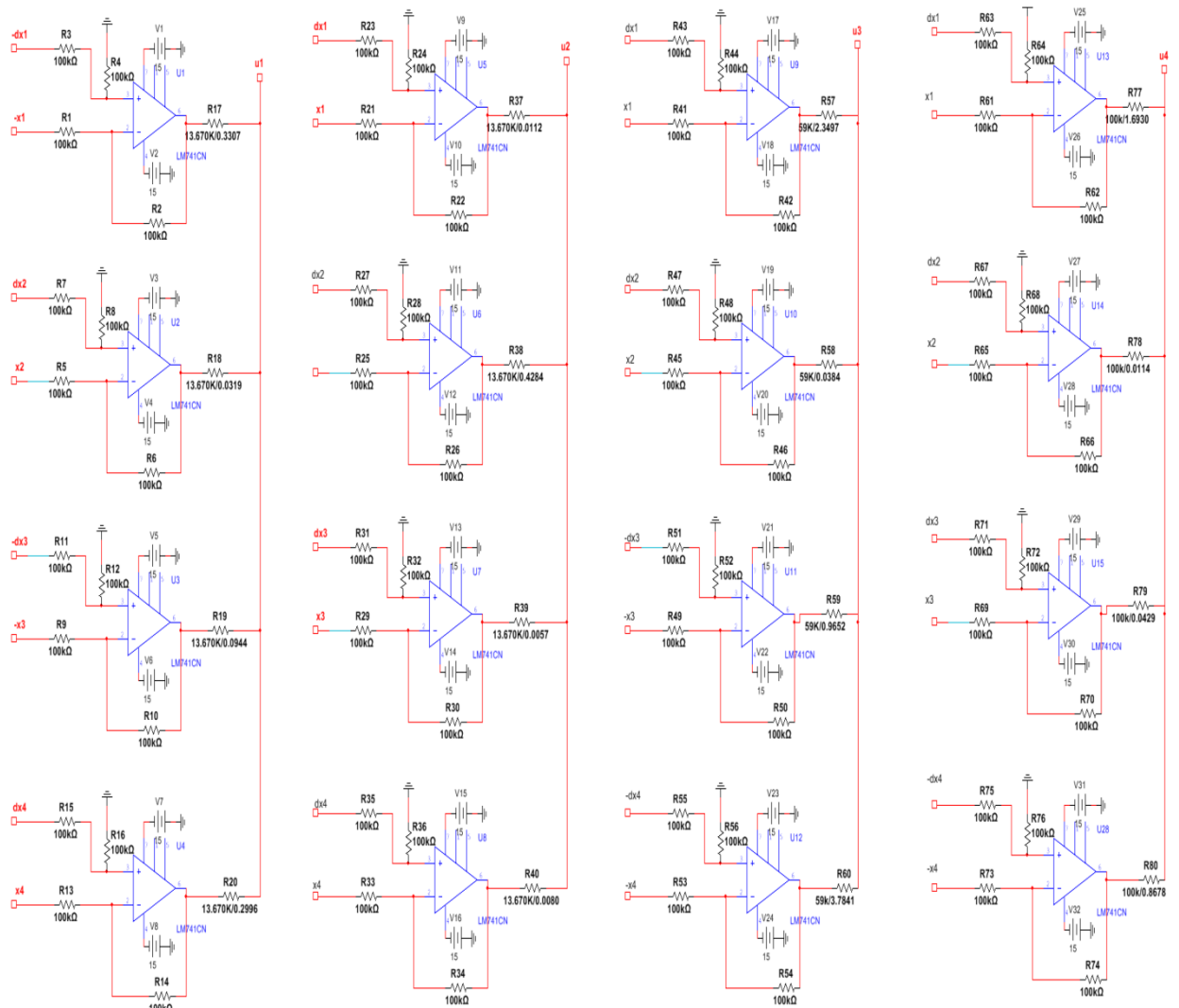


Figure 4.25 Circuit électronique de la commande

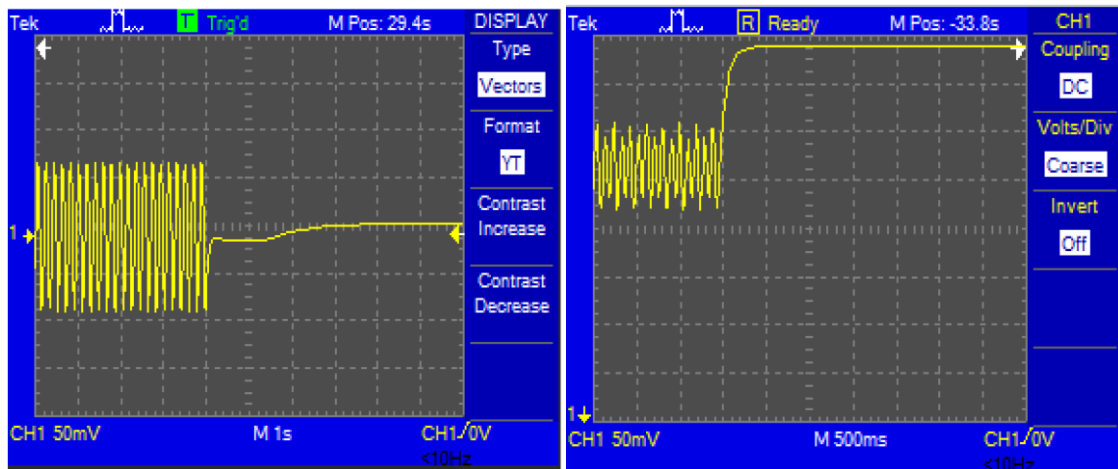


Figure 4.26 Courbe expérimentale de la réponse en temps de $x_1(t)$ avec le contrôleur LMI- prédictif

Figure 4.27 Courbe expérimentale de la réponse en temps de $x_3(t)$ avec le contrôleur LMI- prédictif

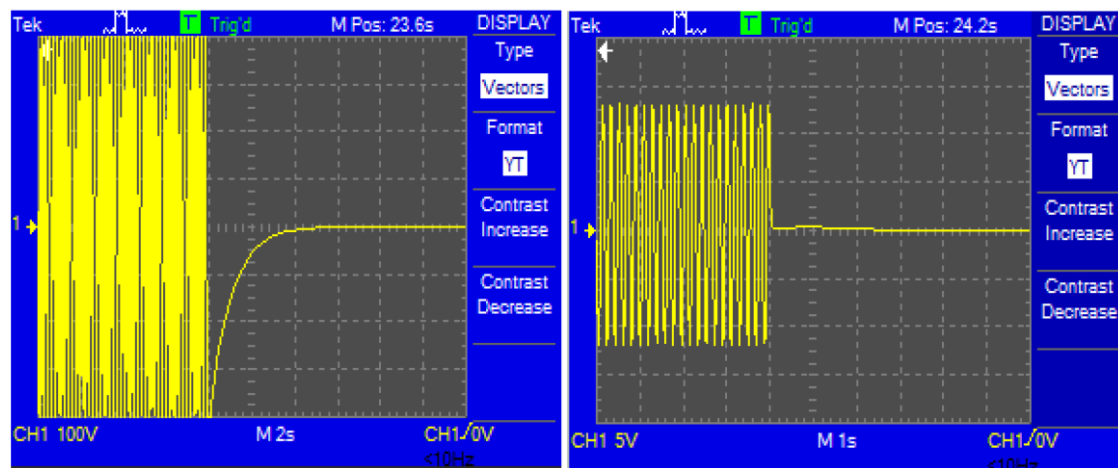


Figure 4.28 Courbe expérimentale de la réponse en temps de $x_4(t)$ avec le contrôleur LMI- prédictif

Figure 4.29 Courbe expérimentale de la réponse en temps de $x_2(t)$ avec le contrôleur LMI- prédictif

4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème de la commande du moteur d'éolienne à comportement chaotique suite à deux types de défauts : défauts des composants et défauts de la commande. Une nouvelle commande prédictive-LMI a été proposée pour contrôler le chaos dans le moteur avec une application expérimentale pour montrer la faisabilité et la simplicité de l'approche proposée.

4.4. Bibliographie

- [1] HEMATI, Neyram. Strange attractors in brushless DC motors. *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, IEEE Transactions on, 1994, vol. 41, no 1, p. 40-45.
- [2] LI, Zhong, PARK, Jin Bae, JOO, Young Hoon, et al. Bifurcations and chaos in a permanent-magnet synchronous motor. *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, IEEE Transactions on, 2002, vol. 49, no 3, p. 383-387.
- [3] GAO, Y. et CHAU, K. T. Design of permanent magnets to avoid chaos in PM synchronous machines. *Magnetics*, IEEE Transactions on, 2003, vol. 39, no 5, p. 2995-2997.
- [4] SU, Kalin et LI, Chunlai. Chaos control of permanent magnet synchronous motors via unidirectional correlation. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, vol. 125, no 14, p. 3693-3696.
- [5] YU, Jinpeng, CHEN, Bing, YU, Haisheng, et al. Position tracking control for chaotic permanent magnet synchronous motors via indirect adaptive neural approximation. *Neurocomputing*, 2015, vol. 156, p. 245-251.
- [6] NGUYEN, Tat-Bao-Thien, LIAO, Teh-Lu, et YAN, Jun-Juh. Adaptive sliding mode control of chaos in permanent magnet synchronous motor via fuzzy neural networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2014.
- [7] QIANG, Chen, YU-RONG, Nan, HENG-HUO, Zheng, et al. Full-order sliding mode control of uncertain chaos in a permanent magnet synchronous motor based on a fuzzy extended state. *Chinese Physics B*, 2015, vol. 24, no 11, p. 110504.
- [8] YU, Jinpeng, YU, Haisheng, CHEN, Bing, et al. Direct adaptive neural control of chaos in the permanent magnet synchronous motor. *Nonlinear dynamics*, 2012, vol. 70, no 3, p. 1879-1887.
- [9] WANG, Jiankui, CHEN, Xiangqing, et FU, Jiankuan. Adaptive finite-time control of chaos in permanent magnet synchronous motor with uncertain parameters. *Nonlinear Dynamics*, 2014, vol. 78, no 2, p. 1321-1328.
- [10] MESSADI, M., MELLIT, A., KEMIH, K., et al. CGPC Control of Chaos in a Permanent Magnet Synchronous Motor Using the Gradient Conjugate and the Genetic Algorithm. 2014.

- [11] WANG, Libiao, FAN, Jian, WANG, Zhengchu, et al. Dynamic Analysis and Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor With External Perturbation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2016, vol. 138, no 1, p. 011003.
- [12] CHEN, Qiang, REN, Xuemei, et NA, Jing. Robust finite-time chaos synchronization of uncertain permanent magnet synchronous motors. *ISA transactions*, 2015, vol. 58, p. 262-269.
- [13] LUO, Shaohua. Adaptive fuzzy dynamic surface control for the chaotic permanent magnet synchronous motor using Nussbaum gain. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2014, vol. 24, no 3, p. 033135.
- [14] ZHENG, Henghuo, CHEN, Qiang, et TANG, Xiaoqing. Composite chattering-free sliding mode control of chaotic permanent magnet synchronous motors. In : *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015 IEEE 10th Conference on. IEEE, 2015. p. 1588-1592.*
- [15] HU, Jian, LIU, Long, et MA, Da-wei. Robust nonlinear feedback control of a chaotic permanent-magnet synchronous motor with a load torque disturbance. *Journal of the Korean Physical Society*, 2014, vol. 65, no 12, p. 2132-2139.
- [16] SENOUCI, Abdelkader et BOUKABOU, Abdelkrim. Predictive control and synchronization of chaotic and hyperchaotic systems based on a T-S fuzzy model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2014, vol. 105, p. 62-78.
- [17] HADEF, Souhila et BOUKABOU, Abdelkrim. Control of multi-scroll Chen system. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, vol. 351, no 5, p. 2728-2741.
- [18] BOUKABOU, Abdelkrim, CHEBBAH, Abdelhamid, et MANSOURI, Noura. Predictive control of continuous chaotic systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2008, vol. 18, no 02, p. 587-592.
- [19] SADAOUI, Djaouida, BOUKABOU, Abdelkrim, MERABTINE, Nadjim, et al. Predictive synchronization of chaotic satellites systems. *Expert systems with applications*, 2011, vol. 38, no 7, p. 9041-9045.
- [20] LORENZ, Edward N. *The essence of chaos*. University of Washington Press, 1995.
- [21] ALLIGOOD, Kathleen T., SAUER, Tim D., et YORKE, James A. *Chaos*. Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [22] STROGATZ, Steven H. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Westview press, 2014.
- [23] HIGHFIELD, Roger. *Frontiers of complexity: The search for order in a chaotic world*. 1996.

- [24] SCOTT, Stephen K. Chemical chaos. Oxford University Press, 1993.
- [25] GRAHAM, David W., KNAPP, Charles W., VAN VLECK, Erik S., et al. Experimental demonstration of chaotic instability in biological nitrification. The ISME journal, 2007, vol. 1, no 5, p. 385-393.
- [26] MARTIN, J. Electrical circuits with chaotic behavior. Proceedings of the IEEE, 1987, vol. 75, no 8, p. 1009.
- [27] HAMICHE, Hamid. Inversion à Gauche des Systèmes Dynamiques Hybrides Chaotiques. Application à la Transmission Sécurisée de Données. 2011. Thèse de doctorat. Université de Tizi Ouzou.
- [28] Ali ZEMOUCHE, Sur l'observation de l'état des systèmes dynamiques non linéaires. thèses de doctorat, Université Louis Pasteur, 2007
- [29] BOUKABOU, Abdelkrim et MANSOURI, Nora. Controlling chaos in higher-order dynamical systems. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2004, vol. 14, no 11, p. 4019-4025.
- [30] OUELLETTE, Diane Valerie. Schur complements and statistics. Linear Algebra and its Applications, 1981, vol. 36, p. 187-295.
- [31] CHEN, D. Y., SHI, Peng, et MA, X. Y. Control and synchronization of chaos in an induction motor system. Int. J. Innov. Comput. Inf, 2012, vol. 8, p. 7237-7248.
- [32] BAZANELLA, Alexandre S. et REGINATTO, Romeu. Robustness margins for indirect field-oriented control of induction motors. IEEE transactions on automatic control, 2000, vol. 45, no 6, p. 1226-1231.
- [33] FATTAH, HA Abdel, LOPARO, Kenneth A., et EMARA, Hassan M. Induction motor control system performance under magnetic saturation. In : American Control Conference, 1999. Proceedings of the 1999. IEEE, 1999. p. 1668-1672.



Conclusion générale

L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. C'est une des formes d'énergie renouvelable.

Dans cette thèse, une attention particulière est portée sur le problème de poursuite du point de puissance maximale MPPT d'un système éolien ainsi que la commande de la génératrice.

Une deuxième attention est portée sur la commande d'une éolienne à comportement chaotique suite aux différents défauts que ce soit de commande ou des composants passifs de la génératrice.

Dans un premier temps, nous avons détaillé les différentes formes d'énergies renouvelables à savoir, l'énergie solaire photovoltaïque, le solaire thermique haute température, le solaire thermique basse température, la biomasse, l'énergie hydraulique – Hydroélectricité et l'énergie éolienne. Ensuite, un historique sur l'énergie éolienne a été introduit avec un bref aperçu de cette énergie en Algérie; à la fin de ce chapitre nous avons présenté les différents types des éoliennes avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous avons présenté les différentes notions générales sur l'énergie éolienne. Les technologies d'éoliennes, les différents composants constituant l'aérogénérateur, le principe de fonctionnement, son modèle mathématique associé ainsi qu'une étude détailler du modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent vu ses avantages incontestés dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Dans le troisième chapitre, nous avons traité le problème de poursuite du point de puissance maximale MPPT d'un système éolien ainsi que la commande de la génératrice. Dans cette optique, nous avons amélioré l'approche de commande du rapport de la vitesse spécifique TSR en proposant l'utilisation de l'optimisation par essais particuliers pour maximiser le coefficient de puissance et l'estimation de l'angle d'inclinaison de la pale ainsi que la vitesse de référence du générateur afin d'extraire le maximum de puissance et réduire le nombre de capteurs. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons proposé l'application de la commande passive pour commander le générateur GSAP afin de suivre la vitesse de référence du générateur estimé à partir du PSO.

Dans le dernier chapitre nous avons abordé le problème du comportement chaotique des éoliennes suites à deux types de défauts, les défauts des composants passifs du générateur et les défauts de la commande PI. Une nouvelle loi de commande a été proposée pour commander l'éolienne lors de ce genre de scénario, elle repose sur l'association de la commande prédictive et Inégalité matricielle linéaire LMI.

Les principales perspectives de notre travail peuvent être regroupées selon deux axes majeurs :

- Implémentation expérimentale de l'approche MPPT sur un banc d'essai éolienne.
- Développement d'une nouvelle stratégie de contrôle sans capteur afin de suivre le point de puissance maximale de l'éolienne en utilisant un observateur non linéaire.

Annexe A

Paramètre de simulation

Paramètre de l'éolienne :

1- Eolienne de puissance 310KW [1]

Nombre de pale 3, $J = 50 \text{ Kg. m}^2$, $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$, $R = 13.8 \text{ m}$, $V_s = 400 \text{ V}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$
 $R_s = 0.4578 \ \Omega$, $L_q = 0.00358 \text{ H}$, $L_d = 0.00335 \text{ H}$, $p = 4$, $\varphi_f = 0.3wb$

2- Eolienne de puissance 2MW [2]

Nombre de pale 3, $J = 70 \text{ Kg. m}^2$, $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$, $R = 40 \text{ m}$, $V_s = 690\text{V}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$
 $R_s = 0.002 \ \Omega$, $L_q = 0.00113 \text{ H}$, $L_d = 0.00111 \text{ H}$, $P = 4$, $\varphi_f = 0.00291wb$

Les paramètres des algorithmes génétiques :

Nombre de génération : 30
Taille de la population : 100
La probabilité de mutation : 10%
Probabilité de croisement : 85%
Angle d'inclinaison $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$

Les paramètres de l'algorithme PSO :

Taille de la population : 100
Masse d'inertie maximal 0.9
Masse d'inertie minimale 0.4
Facteur d'accélération $c_1=2$
Facteur d'accélération $c_2=2$
Angle d'inclinaison $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$

Résumé

Dans le cadre de ce travail de thèse, on s'est intéressé à la modélisation et à la commande d'une éolienne à vitesses variable. Plusieurs approches de commande ont été proposées pour contrôler l'éolienne sous différents régimes de fonctionnement.

Dans le premier cas, une nouvelle approche pour l'extraction du maximum de puissance MPPT pour les vents faibles et forts a été proposée, elle repose sur l'optimisation par essaims particulaires (PSO) du coefficient de puissance pour différentes valeurs du vent, ce qui nous a permis d'avoir la valeur optimale de l'angle d'inclinaison des pales et de la vitesse de rotation angulaire pour lesquelles on extrait le maximum de puissance. Associé à cette approche, nous avons proposé l'utilisation de la commande passive pour commander le générateur synchrone à aimant permanent afin de suivre la vitesse de rotation angulaire de référence déduite à partir du PSO.

Dans le deuxième cas, on a traité le problème de commande d'une éolienne équipée d'un générateur à comportement chaotique dû à deux types de défauts, défaut des composants passifs et défaut de la commande PI. Pour remédier à ce problème, on a proposé l'application des algorithmes génétiques pour l'extraction du maximum de puissance et la commande LMI-prédictive pour contrôler le générateur. Le circuit du générateur ainsi que la commande ont été simulés sous Multisim pour montrer l'efficacité et la faisabilité de l'approche proposée.

Summary

In this work, we studied the modeling and the control of a variable speed wind turbine. Several control approaches have been proposed to control the wind turbine under different operating conditions.

In the first case, a new approach for extracting the maximum of the power MPPT for weak and strong winds was proposed, based on particle swarm optimization (PSO) of the power coefficient for different wind values. This allows us to have the optimum value of the pitch angle and the angular velocity for which the maximum power is extracted. Associated with this approach, we proposed the use of the passive control, to control the Permanent Magnet Synchronous Generator in order to track the reference angular velocity deduced from the PSO.

In the second case, the problem of controlling a wind turbine equipped with a generator with chaotic behavior due to two types of faults, the fault occurrence of the passive components and defects of the PI control, was treated. To overcome this problem, the genetic algorithm has been proposed to extract the maximum power and the LMI-predictive command, to control the generator. The generator circuit as well as the control were simulated under Multisim to show the efficiency and feasibility of the proposed approach.

ملخص

في هذه الأطروحة، كان اهتمامنا بالنمذجة والتحكم في توربينات الرياح بسرعات متغيرة. وقد اقترحت عدة طرق لتحكم على توربينات الرياح في ظل ظروف تشغيل مختلفة بالإضافة إلى دراسة اعطال توربينات الرياح واقتراح عدة حلول لحل هذه المشكلات.

أولاً، قد تم اقتراح نهجاً جديداً لاستخراج الطاقة القصوى MPPT للرياح الضعيفة والقوية، حيث أنه يقوم على تحسين سرب الجسيمات (PSO) من معامل الطاقة لقيم مختلفة من الرياح، التي سمحت لنا أن نستخلص القيمة المثلى لزوايا الميل للشفرات والسرعة الزاوية لتربينة التي يتم استخراج منها الطاقة القصوى. كما اقترحنا استخدام عنصر التحكم السلبي للسيطرة على مولد المغناطيس الدائم المتزامن لمتابعة إشارة سرعة الزاوي المثلى.

ثانياً، تم التعامل مع مشكلة اعطال توربينات الرياح بسبب نوعين من العيوب، خلل في المكونات الإلكترونية وفشل السيطرة PI. ولمعالجة هذه المشكلة، اقترح تطبيق الخوارزميات الجينية لاستخراج أقصى قدر من الطاقة والسيطرة LMI-التنبؤية للسيطرة على المولد. ومحاكاة دارة المولد والتحكم في Multisim لإظهار فعالية وجدوى النهج المقترح