

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Ecole Nationale Polytechnique d'Alger**



**Département d'Automatique**

**Mémoire**

**En vue de l'obtention du diplôme  
d'ingénieur et du diplôme de Master en Automatique**

Thème :

**Modélisation et commande d'une éolienne double-rotor**

**Proposé et encadré par :**

- Mr. HEMICI

**Réalisé par :**

- Mr. TAKHEDMIT Halim  
- Mr. ZAIR Salim

**Promotion : Juin 2012**

**E.N.P-10, Avenue Hassen Badi 16200 EL-Harrach, Alger.**

## المخلص:

في هذه المذكرة قمنا بدراسة كيفية استعمال التربينات الهوائية ثنائية الدوار لاستخلاص الطاقة القصوى. في بداية هذا العمل قدمنا نظرة شاملة حول بعض التقنيات المستخدمة في التربينات العادية (احادية الدوار). ثم استعرضنا دراسة تقنية حول التربينات الثنائية الدوار. بعدها قدمنا نموذج لمولدة التيار المتناوب التزامنية وكذا معدل التيار متناوب-مستمر. في اخر هذا الجزء استعرضنا دراة علاج التيار المولد من طرف المولدة للحصول على فرق كمون ذات شدة و تواتر مستقرين.

في الجزء الثاني تطرقنا الى مشكلة التحكم في الطاقة المنتجة من طرف المولد وكيفية استخلاص الطاقة القصوى. استعملنا تقنيتين. في الاولى استعملنا مقياس شدة الرياح وخاصية التربينة. يمكننا ملاحقة الطاقة القصوى و ذلك باستخدام نظام التحكم IP الكلاسيكي. في التقنية الثانية طورنا من خلالها خوارزمية MPPT لاستخلاص الطاقة القصوى وفق تقنية P&O ثم باستخدام المنطق الغامض. نماذج المحاكاة تبين لنا نتائج الدراسات.

**الكلمات المفتاحية:** تربينة ثنائية الدوار, مولدة التيار المتناوب التزامنية, المنطق الغامض, محول مستمر-مستمر, MPPT.

---

## Résumé :

Dans ce travail, notre intérêt s'est porté sur l'optimisation de la puissance fournie par une éolienne à double-rotor. La chaîne de conversion comporte une éolienne contre-rotative associée à une génératrice synchrone à roue polaire reliée à un redresseur à diodes et un hacheur Buck-Boost pour stabiliser la tension du Bus continu. Un onduleur permet de fournir de l'énergie à la charge. L'excitation du rotor est assurée par un convertisseur DC/DC relié au Bus continu.

La commande agit sur la tension de la roue polaire. Elle permet de contrôler la vitesse de la turbine afin de maintenir le rapport  $\lambda$  à une valeur optimal. Une première approche utilisant un régulateur classique de type PI et un anémomètre est proposée et étudiée. Une deuxième approche utilisant une optimisation par un algorithme MPPT du type P&O (Perturb & Observe) est élaborée. Les simulations montrent les résultats des deux approches étudiées.

**Mot clés :** Turbolienne, MPPT, double rotor, Rendement, Logique flou, génératrice synchrone à roue polaire, Hacheur.

---

## Abstract :

In this work, our interest is focused on optimizing the power output of a dual-rotor turbine. The conversion chain contains our turbine associated with a polar wheel synchronous generator connected to a diode rectifier and a chopper Buck-Boost to stabilize the DC bus voltage. An inverter is used to provide energy to the load. The rotor excitation is provided by a DC / DC converter connected to the DC bus.

The command acts on the voltage of the polar wheel. It controls the turbine speed to maintain the ratio  $\lambda$  at an optimal value. A first approach using a classical PI controller and an anemometer is proposed and studied. A second approach using an optimization algorithm MPPT based on P&O (Perturb & Observe) method is developed. Simulations show the results of both approaches studied.

**Key words:** Duel-rotor, MPPT, Efficiency, Fuzzy logic, Polar wheel synchronous generator, chopper.

# *Remerciement*

*Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.*

*Nos vifs remerciements à notre promoteur Mr HEMICI, pour sa disponibilité, sa bonne humeur et les précieux conseils prodigués tout au long de notre mémoire.*

*Nos sincères remerciements et notre profonde gratitude vont aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant la charge de juger notre travail.*

*Nous tenons à remercier aussi Mr TOUHAMI, Mr MAHMOUDI et Mr MEKTOUB du département génie électrique pour leurs précieux conseils.*

*Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

# *Dédicace*

*A la mémoire de celle qui m'a élevée, qui m'a donnée son amour, à celle qui m'a enseignée la politesse et le respect d'autrui, à ma tendre mère que dieu ait son âme et l'accueille dans son vaste paradis.*

*A la mémoire de l'incarnation de l'innocence, à mon ange gardienne, ma grande sœur Katia. Que Dieu t'accorde sa miséricorde et t'accueille dans son vaste paradis... que tu puisses enfin reposer en paix éternellement.*

*Je dédie se travail à mon père qui s'est sacrifié tout au long de sa vie à mon éducation et mon avenir, à mon petit frère Amir Youba et ma cousine Yasmina qui était toujours là pour me soutenir.*

*A mon grand-père El hadj Abdel Rahman et mes grand parents Mohand Mouloud et Mama Keltouma, que dieu vous garde.*

*A mon cher oncle Mouhand Ouqaci et ma chère tante MAMA Houa pour leurs fraternité et leurs générosité. Sans oublié Tonton Ali et Tata Farida, tante Hassina, mes cousins Rahim et Malek et leur compagnes Nadia et Lynda. Mon petit cousin Nadir, mes cousines Assia, Kenza et Nabila ainsi que son époux Rafik,*

*A tous les profs qui m'ont enseigné à l'Ecole Nationale polytechnique.*

*A tous mes amis, Halim, Sofiane, Imad, Nacer, Lounis, Seif, Amine, Karim, Marzouk, Hamid, et toute la promotion d'automatique.*

*A ma meilleure amie Dalia .... Une affection particulière pour toi.*

*ZAIR Salim.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes parents*

*A ma chère maman qui n'a jamais cessé de me soutenir, de me conseiller, d'accepter mes erreurs et surtout de m'aimer. Malgré tous les moments difficiles mais je pense que maintenant et comme dans l'histoire je suis capable de porter le sac de sel.*

*Mon cher papa qui a toujours veillé à ce que je ne manque de rien en faisant souvent des sacrifices*

*A mes deux frères Fodil et Nazim ou j'ai toujours trouvé refuge à leurs côtés en partageant ensemble les bons et les mauvais moments.*

*A mes deux cousin Kamel et Nourdine. A ma grande mère Wardia, mon oncle Mougek et mes tantes Lila, Hanifa et Linda sans oublier le petit Dani*

*Je dédie ce travail à tous mes amis.*

*Dédicaces spéciales pour toute l'équipe G13 et spécialement pour Madame Riedel et Monsieur Müller.*

*Halim*

# Table des matières

<b>Liste des Symboles</b>	<b>i</b>
<b>Introduction</b>	<b>iv</b>
<b>1 Généralités</b>	<b>1</b>
1.1 Historique de l'éolien . . . . .	1
1.2 L'énergie éolienne . . . . .	2
1.3 Constitution, rendement et types d'éoliennes . . . . .	2
1.3.1 Caractérisation du vent . . . . .	2
1.3.2 Constitution . . . . .	4
1.3.3 Puissance récupérable des aérogénérateurs[4] . . . . .	5
1.3.4 Types d'éoliennes . . . . .	6
1.3.5 Autres types d'aérogénérateurs . . . . .	11
<b>2 Conversion éolienne-électrique</b>	<b>14</b>
2.1 Rendement des éoliennes multi-rotors . . . . .	14
2.2 L'éolienne double rotor . . . . .	15
2.2.1 Chaîne de conversion mécanique . . . . .	15
2.2.2 Rendement . . . . .	17
2.3 Génératrices éoliennes . . . . .	19
2.3.1 Génératrice asynchrone . . . . .	20
2.3.2 Génératrice Synchronne . . . . .	22
2.3.3 Types de Machines électriques pour les petites éoliennes . . . . .	23
2.3.4 Tableau récapitulatifs . . . . .	24
2.4 Conversion électrique . . . . .	26
2.4.1 Pont triphasé à diode . . . . .	26
2.4.2 Redresseur triphasée à thyristor . . . . .	30
2.4.3 Redresseur MLI . . . . .	32
2.5 L'excitation de la génératrice [21] . . . . .	34
2.5.1 Définition . . . . .	34
2.5.2 Différentes sortes de source de puissance [21] . . . . .	35

2.6	Les onduleurs . . . . .	38
2.6.1	Généralités . . . . .	38
2.6.2	Commande des cellules de commutation . . . . .	39
2.6.3	Principe de la conversion continue-alternative . . . . .	40
2.6.4	Commande MLI, principe de la commande triangle-sinusoïdale . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Modélisation de la génératrice et le redresseur</b>	<b>44</b>
3.1	Modélisation de la génératrice . . . . .	44
3.1.1	Modélisation Mathématique . . . . .	44
3.1.2	Simulation de la génératrice : . . . . .	46
3.2	Modélisation du redresseur . . . . .	50
3.2.1	Modélisation du pont de diodes triphasé . . . . .	50
3.2.2	Modélisation du hacheur Buck-Boost . . . . .	51
3.2.3	Modélisation du hacheur abaisseur . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Maximisation de l'énergie collectée</b>	<b>55</b>
4.1	Commande du courant d'excitation . . . . .	55
4.1.1	Découplage du courant inducteur . . . . .	55
4.1.2	Simulation . . . . .	57
4.2	Commande de la vitesse angulaire . . . . .	58
4.2.1	Regulation . . . . .	58
4.2.2	Asservissement de vitesse . . . . .	59
4.2.3	Simulation . . . . .	59
4.3	Commande par puissance optimale . . . . .	61
4.3.1	Principe . . . . .	61
4.3.2	Simulation . . . . .	63
4.4	Commande à base de MPPT . . . . .	65
4.4.1	Caractéristique puissance-vitesse de rotation de l'arbre et la tension d'excitation $V_f$ du système éolienne-génératrice . . . . .	65
4.4.2	La commande MPPT . . . . .	65
4.4.3	Commande MPPT floue . . . . .	68
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>78</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>80</b>

# Table des figures

1.1	Rose des vents, site du Havre (mesure journalière)[3]	3
1.2	Distribution de Weibull pour $k = 2$ , avec $c$ en paramètre [3]	4
1.3	Constitution d'une nacelle	5
1.4	Force du vent exercée sur une surface $S$	5
1.5	effet du vent sur un corps creux[5]	7
1.6	Rotor de la Savonius[5]	7
1.7	Principe de l'incidence variable	8
1.8	Différents types de rotor Darrieus	9
1.9	Turbines éoliennes en amont et en aval [6]	10
1.10	Courbes caractéristiques des aérogénérateurs	10
1.11	Statoéolien [7]	11
1.12	description de wind-it [8]	12
1.13	illustration de l'auto-protection de l'éolienne BSB [9]	12
1.14	éolienne à fouet [10]	13
1.15	éolienne à double rotor [11]	13
2.1	Configuration à n rotors	14
2.2	Chaîne cinématique de l'éolienne [12]	15
2.3	Modèle dynamique de l'éolienne double rotor [12]	16
2.4	distribution du vent dans l'aérogénérateur a double rotors	17
2.5	Schéma de simulation pour le calcul de $C_p$	18
2.6	Courbe des différents $C_p$	18
2.7	Courbe du coefficient de puissance $C_p$	19
2.8	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)[1]	20
2.9	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable[1]	20
2.10	Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor[1]	21
2.11	Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation-régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation [1]	22
2.12	Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [1]	23

2.13	Système éolien basé sur la machine synchrone à roue polaire [1]	23
2.14	Pont de diodes triphasé : [15]	26
2.15	Tensions triphasées et la tension redressée en aval de redresseur.	27
2.16	Pont de diodes avec filtre $LC$	27
2.17	tension du redresseur et la tension aux bornes de la charge	28
2.18	courant $I_a/I_0$ dans la phase a.	28
2.19	Connexion direct pont de diode, Bus-continue.	29
2.20	Hacheur abaisseur.	29
2.21	Hacheur Buck-Boost.	29
2.22	Rapport de tension en fonction du rapport cyclique [1].	30
2.23	Association pont de diode et hacheur survolteur [16].	31
2.24	Redresseur à thyristor avec filtre $LC$ .	31
2.25	Tension redressée avec $\alpha = \frac{\pi}{6}$	32
2.26	Redressement avec $\alpha = \frac{\pi}{6}$	32
2.27	Principe de commande en tension du redresseur MLI	33
2.28	Principe de Fonctionnement du Modulateur MLI à bande d'hystérésis	33
2.29	Modulation MLI à porteuse triangulaire	34
2.30	Principe de l'excitation par machine à courant continue.	36
2.31	Principe de l'excitation par alternateur-excitateur.	36
2.32	Système éolienne avec alternateur-excitateur et Auto-alimentation [20].	37
2.33	Principe de l'excitation par auto-alimentation à dérivation pure	37
2.34	Schéma simplifié de la structure de commande appliquée à des systèmes de faible puissance	38
2.35	Commande non modulée et avance de phase [23]	39
2.36	commande non modulée et retard de phase [23]	40
2.37	Commande modulé [23]	40
2.38	Schéma de base d'onduleurs à MLI [23]	40
2.39	Réglage par modulation d'impulsion [23]	41
2.40	Schéma de base d'onduleurs à niveau [23]	41
2.41	Réglage par niveau de tension [23]	41
2.42	Schéma de commande MLI d'un onduleur avec la méthode triangle-sinusoidale	42
2.43	Signal de porteuse de la commande MLI	42
2.44	Tension à la sortie de l'onduleur MLI	43
2.45	Courants d'une charge résisto-inductive à la sortie de l'onduleur MLI	43
3.1	Représentation $abc$ de la machine synchrone	44
3.2	Représentation $dq$ de la machine synchrone	44
3.3	Résultats de simulation avec $V_f=160V$ et $\omega=1500tr/min$	48

3.4	Résultats de simulation avec $V_f=160V$ et $C_{eol}$ variable . . . . .	49
3.5	Redresseur à diode. . . . .	50
3.6	Filtre $LC$ . . . . .	51
3.7	Tension de sortie du hacheur . . . . .	52
3.8	Hacheur Buck pour l'alimentation du Rotor . . . . .	53
3.9	Tension de sortie du hacheur abaisseur . . . . .	54
3.10	Tension de sortie du hacheur abaisseur avec charge inducto-résistive . . . . .	54
4.1	Schéma équivalent après découplage. . . . .	56
4.2	Schéma de régulation du courant d'excitation . . . . .	56
4.3	Couple appliqué . . . . .	57
4.4	Résultats de simulation pour le courant d'excitation $I_f$ . . . . .	58
4.5	boucle d'asservissement de vitesse . . . . .	59
4.6	Résultats de simulation avec variation du $C_{eol}$ . . . . .	60
4.7	consigne de vitesse . . . . .	61
4.8	zoom sur la consigne de vitesse . . . . .	61
4.9	Vitesse optimale . . . . .	62
4.10	Commande pour la poursuite de $\Omega_{opt}$ . . . . .	62
4.11	Résultats de simulation pour le un vent perturbé . . . . .	63
4.12	vent appliqué . . . . .	64
4.13	puissance de sortie . . . . .	64
4.14	Résultats de simulation pour le 1 <sup>er</sup> vent . . . . .	64
4.15	Caractéristique puissance-vitesse de rotation de l'arbre et la tension d'excitation $V_f$ du système éolienne-génératrice . . . . .	65
4.16	L'évolution de la puissance sous l'effet de la perturbation $\Delta V_f$ . . . . .	66
4.17	Algorithme MPPT $P\&O$ . . . . .	67
4.18	Courbe de poursuite de la commande MPPT pour des échelons de vent à vitesse constante . . . . .	67
4.19	Courbe de poursuite de la commande MPPT pour des échelons de vent à vitesse variable . . . . .	68
4.20	Proportionnalité entre le $\Delta V_f$ et l'écart entre la puissance maximale et la puissance extraite . . . . .	69
4.21	Fonction de répartition triangulaire . . . . .	70
4.22	Fonction de répartition trapézoïdale . . . . .	70
4.23	Fonction de répartition cloche . . . . .	70
4.24	Fonction de répartition gaussienne . . . . .	70
4.25	Fonction de répartition sigmoïde . . . . .	70
4.26	Structure générale d'un système de commande basé sur la logique floue [26]	71
4.27	Principe de fonctionnement de MPPT floue à vitesse de vent constante [25]	72

4.28	Principe de fonctionnement de MPPT floue à vitesse de vent variable [25] .	73
4.29	Fonctions d'appartenance de la variable $\Delta P$ . . . . .	74
4.30	Fonctions d'appartenance de la variable $\Delta \Omega$ . . . . .	74
4.31	Schéma de simulation du bloc de commande floue . . . . .	76
4.32	Courbe de poursuite de la commande MPPT-floue pour des échelons de vent à vitesse constante . . . . .	77
4.33	Courbe de poursuite de la commande MPPT-floue pour des échelons de vent à vitesse variable . . . . .	77

# Liste des Symboles

$C_1$	:	couple développé par l'arbre de transmission lent.
$C_2$	:	couple développé par l'arbre de transmission rapide.
$C_T$	:	coefficient qui caractérise la fiabilité qui est en général égal à 0.9.
$C_a$	:	couple développé par l'arbre de transmission principal.
$C_p$	:	le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine, il caractérise l'amplitude de la turbine à capter le vent.
$D_{m1}$	:	coefficient d'amortissement dans l'arbre lent.
$D_{m2}$	:	coefficient d'amortissement dans l'arbre rapide.
$D_{m3}$	:	coefficient d'amortissement dans l'arbre principal.
$D_{m13}$	:	coefficient d'amortissement de l'engrenage entre l'arbre lent et principal.
$D_{m23}$	:	coefficient d'amortissement de l'engrenage entre l'arbre rapide et principal.
$E$	:	module de Young.
$F(v_w)$	:	distribution de Weibull du vent.
$I_1$	:	moment d'inertie de l'engrenage de l'arbre de transmission lent.
$I_2$	:	moment d'inertie de l'engrenage de l'arbre de transmission rapide.
$I_3$	:	moment d'inertie de l'engrenage de l'arbre de transmission principal.
$I_a$	:	moment d'inertie de l'arbre.
$I_e$	:	moment d'inertie de la roue d'engrenage.
$J$	:	Moment d'inertie de l'ensemble turbine-génératrice.
$K_{m13}$	:	coefficient de raideur de l'engrenage entre l'arbre lent et principal.
$K_{m23}$	:	coefficient de raideur de l'engrenage entre l'arbre rapide et principal.
$K_{max}$	:	coefficient de raideur maximum.
$K_{min}$	:	coefficient de raideur minimum.
$L$	:	longueur de la dent d'engrenage.

$L_d, L_q$	:	inductances cycliques statorique dans le repère d et q.
$L_f$	:	inductances cycliques rotorique.
$M$	:	L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor.
$P_0$	:	la puissance contenue dans une masse d'air en mouvement.
$P_{turbine}$	:	la puissance récupérée par la turbine.
$R_p$	:	le rayon de la pale.
$R_s, R_f$	:	Résistances statorique et rotorique de la machine.
$S$	:	surface de la section de l'aérogénérateur.
$T_{rd}$	:	temps de cycle de raideur de l'engrenage.
$V_w$	:	la vitesse su vent.
$a$	:	le rapport entre la vitesse du vent à l'entrée et au milieu de la turbine respectivement.
$a_i$	:	puissance du vent extraite par le rotor $i$ .
$b_i$	:	puissance du vent disponible à la sortie du rotor $i$ .
$c$	:	facteur d'échelle.
$i_a, i_b, i_c$	:	Courants triphasés dans le stator.
$i_d, i_q$	:	Courants statoriques dans le référentiel d-q.
$i_f$	:	Courant d'excitation au rotor.
$k$	:	facteur de forme, sans dimension, caractérisant l'asymétrie de la distribution de Weibull.
$p$	:	nombre de paires de pôles.
$r_{1moy}$	:	rayon moyen de la roue d'engrenage de l'arbre lent.
$r_{2moy}$	:	rayon moyen de la roue d'engrenage de l'arbre rapide.
$r_{3moy}$	:	rayon moyen de la roue d'engrenage de l'arbre principal.
$r_{am}$	:	rayon moyen de l'arbre.
$r_{em}$	:	rayon moyen de la roue d'engrenage.
$v'$	:	la vitesse du vent à la hauteur des pales
$v_1$	:	la vitesse en amont de la turbine.
$v_2$	:	la vitesse en aval de la turbine.
$v_a, v_b, v_c$	:	Tensions triphasés aux bornes du stator.
$v_d, v_q$	:	Tensions statoriques dans le référentiel d-q.
$v_f$	:	tension d'excitation du rotor de la machine synchrone à roue polaire.

$v_x$	:	vitesse du vent à une distance $x$ du rotor principal.
$x$	:	distance par rapport au rotor principal pour la quelle on mesure la vitesse du vent.
$\Omega$	:	vitesse de rotation de l'arbre (rad.sec-1).
$\varepsilon_{conique}$	:	taux de contact.
$\xi$	:	taux d'amortissement.
$\theta_1$	:	position angulaire de la roue d'engrenage de l'arbre de transmission lent.
$\theta_2$	:	position angulaire de la roue d'engrenage de l'arbre de transmission rapide.
$\theta_3$	:	position angulaire de la roue d'engrenage de l'arbre de transmission principal.
$\lambda$	:	la vitesse réduite.
$\nu$	:	coefficient de poisson.
$\rho$	:	masse volumique de l'air.
$\phi_d, \phi_q$	:	Flux statoriques dans le référentiel d-q.
$\phi_f$	:	Flux inducteur.
$\omega$	:	pulsation électrique au stator. ( $\omega = p\Omega$ ).

# Introduction

De nos jours, l'électricité est la source d'énergie la plus utilisée. Le développement économique mondial ne cesse de croître, et avec elle la demande en énergie électrique. Une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée par les ressources fossiles. Ces énergies polluent notre planète. Elles sont la cause des émissions de gaz à effet de serre qui réchauffe l'environnement et dérègle le climat. Il demeure que ces énergies ne sont pas inépuisables, et leur utilisation excessive risque de compromettre l'avenir énergétique des générations futures.

Pour assurer leur indépendance énergétique, certains pays ont déjà entamé une politique de développement des énergies renouvelables, tel que : le solaire, la géothermie, l'hydraulique et l'éolien. Cette dernière a déjà existé dans le passé sous forme de moulins à vent. Ils servaient à moudre les grains ou à pomper l'eau des rivières. Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie en plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes, de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles.

L'aérogénérateur est la technologie la plus utilisée pour exploiter l'énergie du vent. Sa production peut varier de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatt. Le type le plus utilisé est l'éolienne tripale à axe horizontal.

Pourtant, le petit éolien connaît un essor important et offre une solution intéressante pour le milieu rural et les sites isolés. Son association avec des panneaux solaires et un support diesel est envisageable en raison de la caractéristique intermittente du vent. Le recours à une électronique de commande est une tendance qui s'avère efficace. Elle permet d'élargir la plage d'exploitation de vitesse du vent et d'augmenter l'énergie exploitable.

Le rendement des éoliennes tripales classiques se situe autour de 0,4. Cette caractéristique est bornée par la limite de BETZ qui atteint un maximum de 0,59. Pourtant, cette limite n'est pas insurmontable. Des études récentes ont été menées afin de concevoir des éoliennes plus performantes offrant de meilleures caractéristiques de puissance.

Nous envisageons dans ce mémoire d'améliorer le coefficient de puissance en utilisant une éolienne à double-rotor (contre-rotatif) associée à une génératrice et un dispositif de conversion AC/DC, un bus-continue et un onduleur.

Le premier chapitre traite les généralités sur l'énergie éolienne. Il présente les princi-

paux types d'éoliennes utilisés et aussi des prototypes innovants dans le but d'améliorer l'esthétique et le rendement des éoliennes.

Dans le Deuxième chapitre, nous développons une modélisation de l'éolienne double-rotor. Nous proposons aussi un modèle mécanique de l'éolienne double-rotor prenant en compte le phénomène d'élasticité et les pertes au niveau des connexions afin de déterminer le coefficient de puissance de la turbine. Une vue globale sur les aérogénérateurs utilisés dans ce domaine et les différentes technologies de Conversion électrique employées sont analysées.

Le troisième chapitre concerne la modélisation de la génératrice synchrone à roue polaire ainsi que l'étage de conversion AC/DC. Nous allons présenter les différents types d'excitation de cette machine et les équations caractéristiques. Puis des résultats de simulations de notre machine.

Le quatrième chapitre porte sur la commande de la puissance à la sortie de la génératrice. Deux stratégies sont proposées : la première est un contrôle de type PI classique en mesurant la vitesse du vent et en utilisant la caractéristique de la turbine déjà trouvée. La deuxième utilise un algorithme MPPT basé sur la méthode P&O (Perturb & Observe), en agissant sur la tension d'excitation, on fait fonctionner la machine autour du point de puissance maximale. Puis on utilise le même algorithme mais avec la logique floue pour améliorer ces performances.

# Chapitre 1

## Généralités

### 1.1 Historique de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la navigation maritime, les moulins à vent et les installations permettant le pompage de l'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à environ 2 000 ans avant J-C. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour mouliner le grain, d'où leur nom de " moulin ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher les terrains inondés. Dès le XIV<sup>e</sup> siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Rien qu'en Hollande et au Danemark vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le nombre des moulins est estimé à plus de 30.000 ,et en Europe à 200.000. Avec l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent à régresser.

La domestication de l'électricité donna l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne à une génératrice. Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux États-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les sites isolés. Dans les années 60, fonctionnaient dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et la réalisation des éoliennes dans le monde [1]. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. Son potentiel est énorme. Il est estimé à  $30 \cdot 10^{15}$  kWh pour l'ensemble du globe et entre 5 et  $50 \cdot 10^{12}$  kWh/an pour la part terrestre exploitable [2].

## 1.2 L'énergie éolienne

Les éoliennes modernes sont de plus en plus concurrentielles avec les sources traditionnelles de production d'énergie. Elles ne sont plus une technologie expérimentale, mais bien des équipements disponibles dans le commerce. Il est possible d'en installer une seule ou d'en mettre plusieurs ensemble et de former ainsi un parc d'éoliennes.

La densité relativement faible de l'air complique la tâche d'extraction d'énergie, en effet, moins un fluide en mouvement est dense, plus il est difficile d'en extraire de l'énergie utile. En réalité, l'eau est presque mille fois plus dense que l'air. ce qui explique le penchant pour l'énergie hydraulique au détriment de l'énergie éolienne. Il y a eu, néanmoins, des progrès scientifiques importants dans le domaine des éoliennes. Ils ont permis de transformer efficacement le vent en électricité et de rendre «l'énergie éolienne » moderne, presque aussi concurrentielle sur le plan prix que les sources d'électricité traditionnelles. Cependant, beaucoup de gens croient qu'une éolienne se base essentiellement sur la mécanique et l'aérodynamique. Pourtant, les éoliennes sont aussi et surtout des machines électriques. Les défis techniques et les coûts de réalisation d'une éolienne résident surtout désormais dans le domaine de l'électrotechnique. D'où le nom de "centrale éolienne". En d'autres termes, l'ensemble des composants qui permettent de produire de l'électricité. La "turbine" n'étant qu'une partie de cet ensemble.

## 1.3 Constitution, rendement et types d'éoliennes

### 1.3.1 Caractérisation du vent

La rose des vents est un diagramme polaire qui permet de connaître la vitesse et la direction du vent sur la période des relevés. On affiche trois éléments (figure 1.1) :

- le pourcentage du temps global pendant lequel le vent souffle suivant une direction donnée (indiqué par la zone bleue claire) ;
- le pourcentage d'énergie totale par secteur (représenté par les secteurs bleus foncés). Cela indique la direction qui fournit le maximum d'énergie ;
- la moyenne de la turbulence en intensité par secteur est représentée par un nombre s'affichant sur chaque zone.

L'intensité de la turbulence est déterminée sur une durée de mesure en calculant le ratio « écart type divisé par vitesse moyenne ». Ce relevé permet de connaître le positionnement des éoliennes par rapport à d'éventuels obstacles. C'est un diagramme spatiotemporel produit ou utilisé par des logiciels professionnels pour évaluer qualitativement les possibilités d'un site. La quantification du « gisement » éolien se fait surtout à partir de fonctions de distribution des vitesses classées [3].

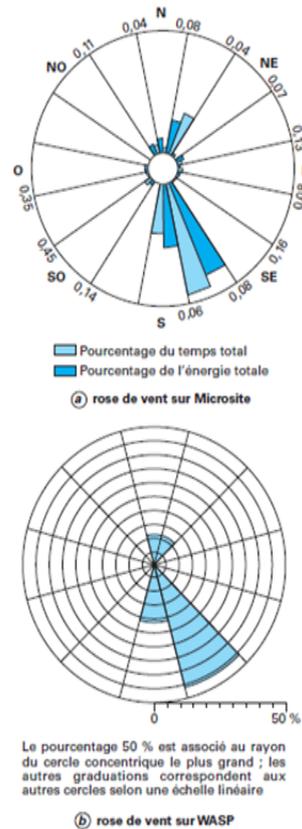


FIGURE 1.1 – Rose des vents, site du Havre (mesure journalière)[3]

### Caractéristiques de distribution et répartition de la vitesse du vent

En disposant, pendant une période de référence, d'un ensemble de  $N$  valeurs mesurées de la vitesse du vent  $v$ . On détermine la caractéristique de distribution des vitesses du vent et la caractéristique des fréquences cumulées 1.1 (déterminées ici pour  $\Delta v = 0,5m/s$ ) [3].

Pour effectuer une analyse des principales propriétés statistiques, on utilise les modèles mathématiques des fonctions de distribution.

### Distribution de Weibull

Si le nombre d'échantillons  $N$  relevés tend vers l'infini, et  $\Delta v \rightarrow dv$ , la fréquence  $f_i$  et la fréquence cumulée  $F_i$  tendent, respectivement, vers la fonction de densité de probabilité  $f(v)$  et vers la fonction de répartition  $F(v)$ . Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée utile pour la description des propriétés statistiques du vent.

La fonction de répartition de Weibull à deux paramètres  $c$  et  $k$  s'écrit 1.1 :

$$F(v_w) = 1 - e^{(-\frac{v_w}{c})^k} \tag{1.1}$$

On donne à la figure 1.2 la densité de probabilité pour le cas  $k = 2$ , paramétré par  $c$ .

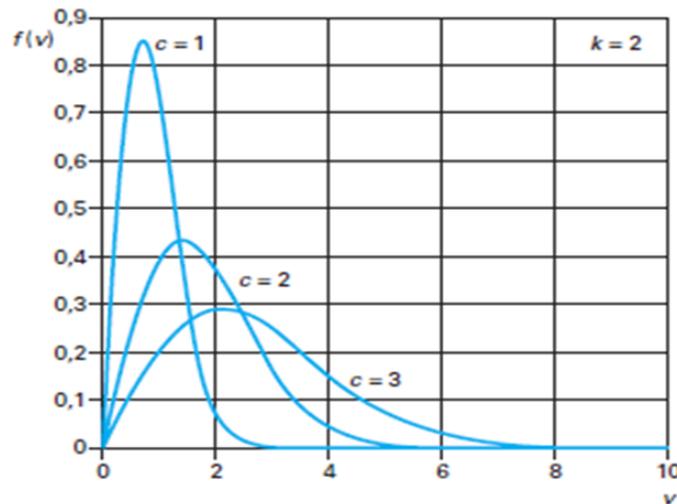


FIGURE 1.2 – Distribution de Weibull pour  $k = 2$ , avec  $c$  en paramètre [3]

Le calcul des paramètres  $c$  et  $k$  est fait en partant du diagramme des fréquences mesurées. Cette courbe statistique permet d'évaluer l'importance des tranches de vitesse de vents pour la production d'énergie en fonction des caractéristiques de la turbine. Le potentiel énergétique ainsi défini sera plus ou moins bien exploité en fonction des contraintes physiques comme les limitations du système électromécanique et les efforts s'exerçant sur la structure.

### 1.3.2 Constitution

Les éoliennes sont constituées généralement d'une hélice, d'une nacelle et d'une tour :

- L'hélice est composée de pales. Elle transforme l'énergie présente dans le vent en un mouvement rotatif. Pour cela, les pales se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage. L'énergie collectée dépend de la vitesse du vent et de la surface balayée par l'hélice. L'humidité de l'air sert de lubrifiant au vent. Elle rend le mouvement des pales plus fluide. La haute pression atmosphérique (basse altitude) est aussi un facteur favorable à l'augmentation du rendement.
- La nacelle abrite l'alternateur et d'autres systèmes (la boîte de vitesse et les commandes des pales) (figure 1.3).
- La tour quand à elle doit soutenir le poids de l'appareil. Elle assure la résistance aux vibrations pendant toute sa durée de vie. Elle est généralement construite en acier. Elle renferme une échelle qui permet l'accès à la nacelle pour d'éventuels entretiens. Toutefois, il existe aussi certaines tours construites sous forme de pylônes en treillis.

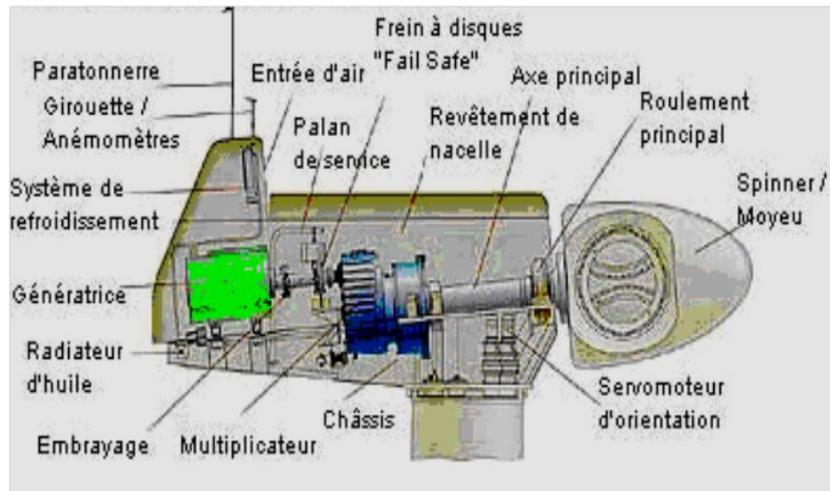
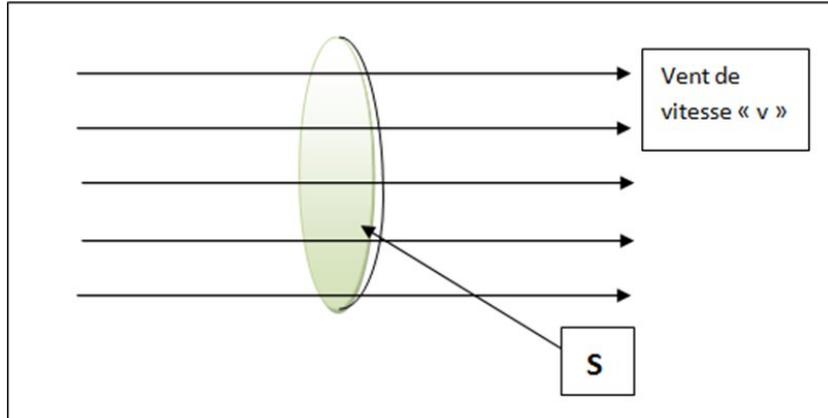


FIGURE 1.3 – Constitution d'une nacelle

### 1.3.3 Puissance récupérable des aérogénérateurs[4]

Une masse volumique d'air  $\rho$  [ $kg/m^3$ ], qui se déplace à une vitesse  $v$  [ $m/s$ ] engendre une puissance  $P_0$ , quand elle percute une surface  $S$  perpendiculaire à la direction du flux (puissance spécifique) :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v^3 S [W] \quad (1.2)$$

FIGURE 1.4 – Force du vent exercée sur une surface  $S$ 

Dans son article publié en 1926, Albert BETZ a démontré que le rendement des éoliennes ne peut pas dépasser les 59% (exactement  $\frac{16}{27}$ ) de la puissance présente dans le vent.

Soit un rotor idéal (sans pertes), propulsé par un vent de vitesse constante  $v$ . La surface balayée par les pales est  $S$ . Le rotor, raccordé à un générateur électrique ou autre récepteur d'énergie mécanique, tire de la puissance du vent. Soit  $v'$  la vitesse du vent à la hauteur des pales,  $v_2$  la vitesse en aval. Sous les hypothèses suivantes :

- Le rotor n'a pas de pertes mécaniques et aérodynamique.
- L'air est incompressible durant son passage dans le rotor.

– Le flux est laminaire avant et après le rotor.

la relation suivante est valable :

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (1.3)$$

On pose :

$$a = \frac{v'}{v} \quad (1.4)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{v_2}{v} \right) \right] P_0 \quad (1.5)$$

de 1.3 et 1.4 on tire :

$$\frac{v_2}{v} = 2a - 1 \quad (1.6)$$

si on remplace 1.6 dans 1.5, on aura :

$$P_w = 4[a^2 - a^3]P_0 \quad (1.7)$$

De la relation 1.7 on constate que  $P_w$  dépend essentiellement du facteur de ralentissement.

$$\frac{dP_w}{da} = 4[2a - 3a^2]P_0 = 0 \quad (1.8)$$

De la relation 1.8 deux solutions sont possibles :

$$\begin{cases} a = 0 & \text{solution correspondant au minimum (rejetée)} \\ a = \frac{2}{3} & \text{acceptée} \end{cases}$$

On remplace la valeur de  $a$  dans la relation 1.7, on trouve :

$$P_w = \frac{16}{27}P_0 \approx 0.59P_0 \quad (1.9)$$

Finalement la puissance extraite peut être exprimée par la relation :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2}C_p\rho\pi R_p^2v_w^3 \quad (1.10)$$

### 1.3.4 Types d'éoliennes

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes. Les deux principaux groupes sont : à axe horizontal et à axe vertical.

#### Machines à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur

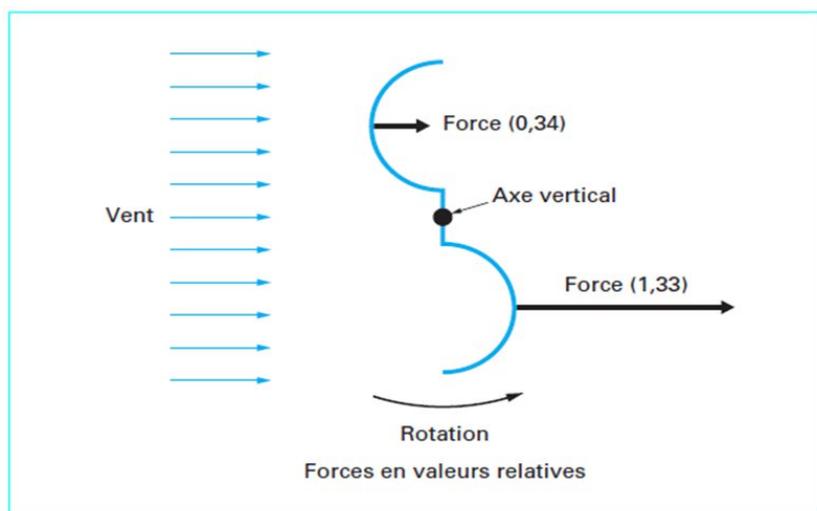


FIGURE 1.5 – effet du vent sur un corps creux[5]

au niveau du sol (facilement accessibles). De nombreuses variantes ont été testées depuis le début du vingtième siècle. Deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation : l'éolienne Savonius et l'éolienne de Darrieus. Elle fonctionnent selon les principes de la traînée différentielle et la variation cyclique d'incidence [5].

**Traînée différentielle :** Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente (voir figure 1.5).

Il en résulte un couple moteur, qu'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique (une pompe par exemple). L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius (voir figure 1.6).

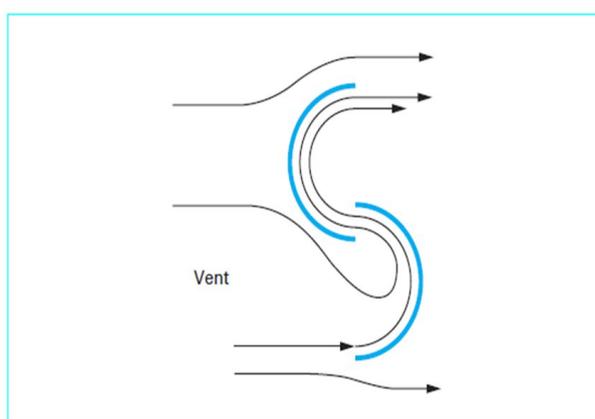


FIGURE 1.6 – Rotor de la Savonius[5]

Le fonctionnement est ici amélioré par rapport à l'anémomètre par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres. Le couple moteur se trouve augmenté.

On peut aisément imaginer que lors du démarrage de ce type de machine (phase d'établissement du vent), les cylindres sont orientés par rapport au vent. Le couple résultant sera nul. L'éolienne ne pourra pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques décalés d'un certain angle, permet de remédier à ce problème. Cette disposition rend la machine totalement autonome. Il est intéressant de noter que ce type de rotor peut être construit à partir de fûts industriels découpés, ce qui facilite son implantation dans les pays en voie de développement[5].

**Variation cyclique d'incidence :** Le fonctionnement est basé sur un profil spécial. Dans un écoulement d'air, les différents angles sont soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère un couple moteur (voir figure 1.7). Ce principe de fonctionnement a été breveté vers les années 1930 par le Français Dar-

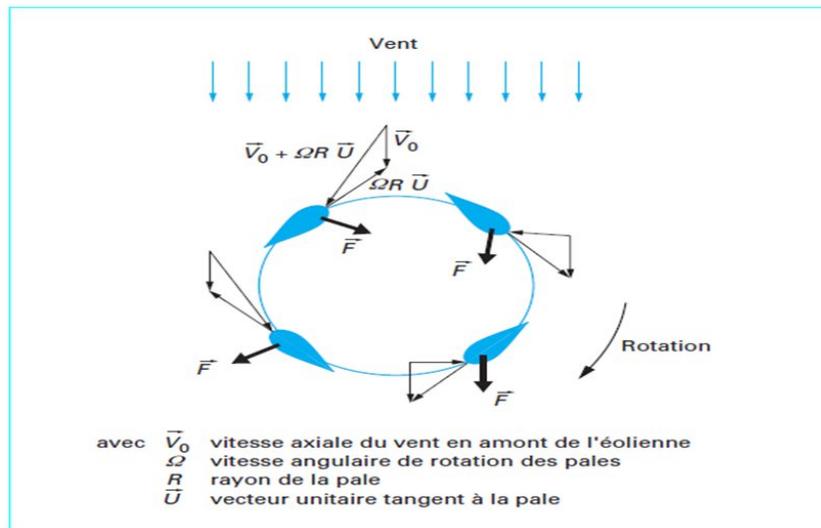


FIGURE 1.7 – Principe de l'incidence variable

rius. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique... (voir figure 1.8). Le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pales, implique que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement s'avère donc nécessaire. Pour cela, différentes solutions ont été expérimentées par les constructeurs : montage d'une autre éolienne de type Savonius par exemple sur l'axe vertical, utilisation de la génératrice électrique en moteur...,etc. Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant pas l'édification d'une tour, par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction du vent. Ce qui permet de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine. En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient du vent, turbulences due aux accidents du terrain en amont de la machine), ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. En outre, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations

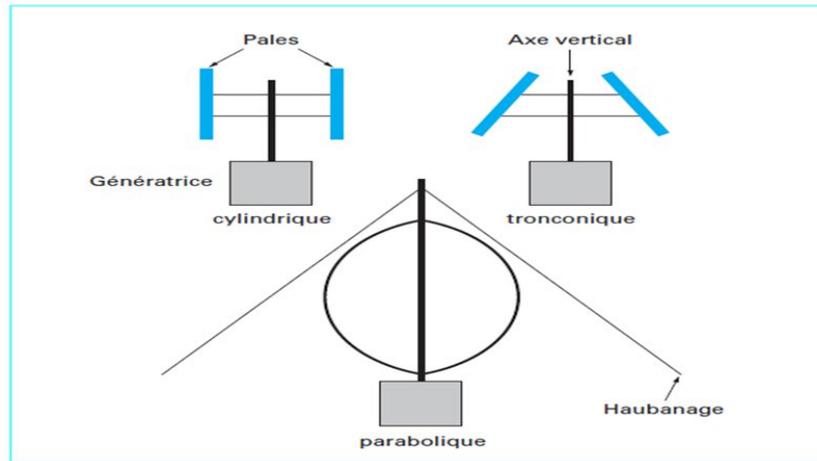


FIGURE 1.8 – Différents types de rotor Darrieus

incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité. Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente[5].

### Machines à axe horizontal

Une turbine à axe de rotation horizontal se comporte face au vent comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal. Ce choix présente plusieurs avantages, comme la faible vitesse d'amorçage (cut in) et un coefficient de puissance relativement élevé. Toutefois, la boîte de vitesses et la machine électrique doivent être installées en haut de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques. Par ailleurs l'orientation automatique de l'hélice face au vent nécessite un organe supplémentaire ( queue , yaw control ...).

Selon son nombre de pales, une HAWT est dite mono-pale, bi-pale, tripale ou multi-pale. Une éolienne mono-pale est moins coûteuse car les matériaux sont en moindre quantité et les pertes aérodynamiques par poussée (drag) sont minimales. Cependant, un contrepoids étant nécessaire et ce type d'éolienne n'est pas très utilisé. Tout comme les rotors mono-pales, les rotors bi-pales doivent être munis d'un rotor basculant pour éviter que l'éolienne ne reçoive des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour (Windpower, 2007). Donc, pratiquement toutes les turbines éoliennes installées ou à installer prochainement sont du type tripale. Celles-ci sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et elles présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement. Suivant leur orientation en fonction du vent, les HAWT sont dites en amont (upwind) ou en aval (down-wind). La figure 1.9 montre les deux types mentionnés[6].

Les premières ont le rotor face au vent ; puisque le flux d'air atteint le rotor sans

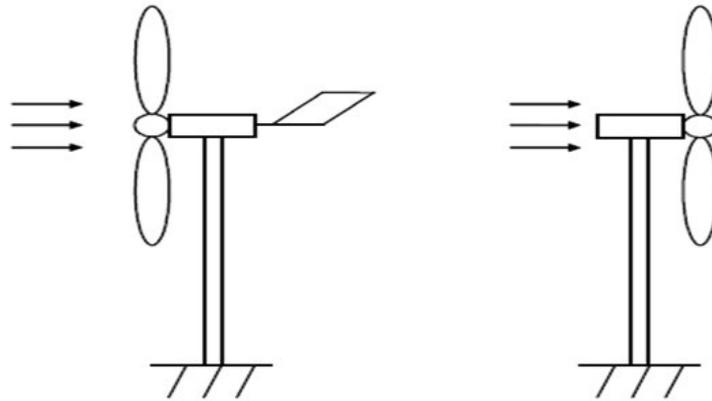


FIGURE 1.9 – Turbines éoliennes en amont et en aval [6]

obstacle, le problème de l'ombre de la tour (tower shadow) est bien moindre. Néanmoins, un mécanisme d'orientation est essentiel pour maintenir en permanence le rotor face au vent. Les éoliennes à rotor en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme d'orientation mais le rotor est placé de l'autre côté de la tour : il peut donc y avoir une charge inégale sur les pales quand elles passent dans l'ombre de la tour. De ces deux types d'éoliennes, celle en amont est largement prédominante[6].

### $C_p$ Caractéristique des différents types d'aérogénérateurs

Le graphique de la figure 1.10 donne une vue sur les coefficients de puissance  $C_p$  habituels en fonction de la vitesse réduite  $\lambda$  pour différents types d'éoliennes.

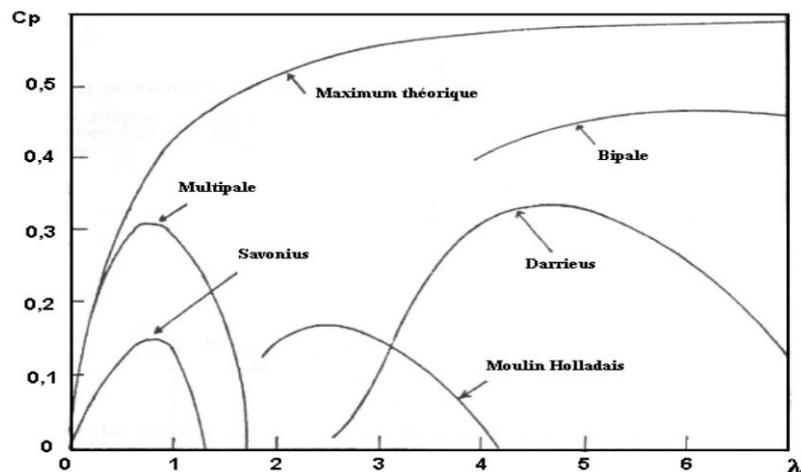


FIGURE 1.10 – Courbes caractéristiques des aérogénérateurs

### 1.3.5 Autres types d'aérogénérateurs

Le problème majeur de l'énergie éolienne est le rendement qui ne dépasse pas les 59%. En pratique les éoliennes les plus optimisées, ont un rendement qui ne dépasse pas les 45-50%. Pour remédier à ce problème plusieurs prototypes ont été proposés.

#### Statoéolien

Le STATOEOLIEN est une éolienne à axe vertical, constituée d'un stator fixe et d'un rotor mobile, il est destiné à être implantée en milieu urbain. Il offre la possibilité de produire de l'énergie renouvelable au cœur des villes tout en s'intégrant esthétiquement et techniquement aux structures bâties. Il est adapté aux vents urbains à fort caractère turbulent, ainsi qu'aux contraintes architecturales modernes (voir figure 1.11).

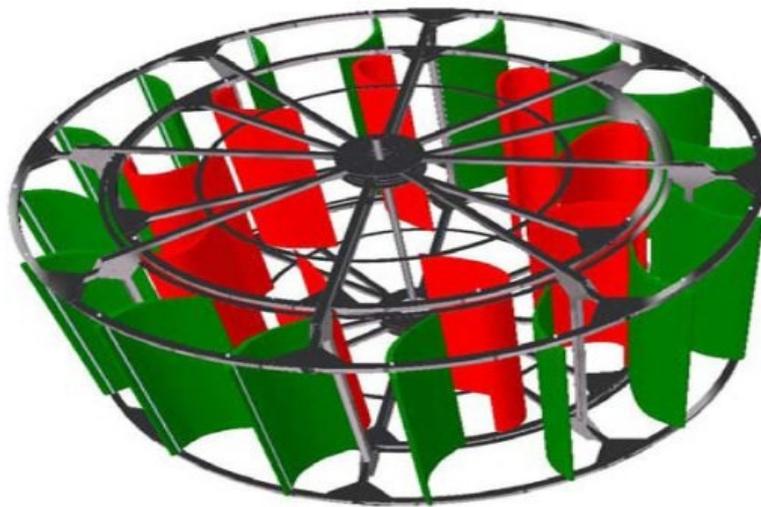


FIGURE 1.11 – Statoéolien [7]

Le caractère asymétrique du STATOEOLIEN lui permet d'être totalement indépendant vis-à-vis de la direction du vent. De fait, les ailettes fixes du stator et les aubes mobiles du rotor sont réparties de manière symétrique autour de l'axe vertical de la machine, ne favorisant ainsi aucune direction privilégiée de fonctionnement. Il en résulte un fonctionnement optimal quelle que soit la direction du vent, ce qui est particulièrement utile en milieu urbain, dans la mesure où les écoulements turbulents se manifestent par des changements fréquents de direction[7].

#### Les éoliennes du projet Wind-it

La particularité de ces éoliennes est leurs tours. Se sont des éoliennes de types Darriues installées sur les poteaux du réseau électrique comme le montre la figure 1.12.

La hauteur des poteaux permet l'accès à des vents très forts, ainsi que l'intégration de l'éolienne dans le paysage urbain et la réduction de la pollution visuelle que produisent

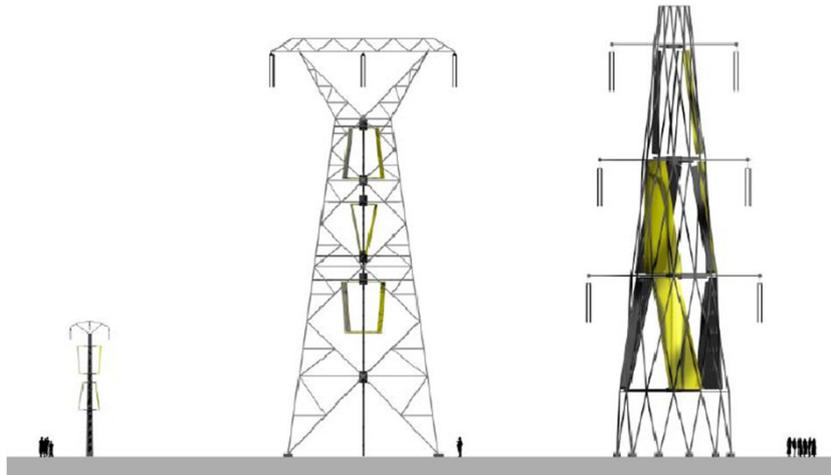


FIGURE 1.12 – description de wind-it [8]

généralement les éoliennes traditionnelles.

### Eolienne BSB

Équipée de 4 pâles horizontales tournant d'une part autour d'un axe vertical commun sur  $360^\circ$  et chacune sur elle-même autour de leur axe propre sur un angle de  $90^\circ$  environ. Le rotor aura une envergure de huit mètres pour une hauteur de 1m30 environ. L'ensemble monté avec le stator sera d'environ 8m60 de diamètre pour une hauteur de 1M80. La particularité de cette éolienne est qu'elle s'auto-protège tout en adaptant l'ouverture des pâles avec la vitesse du vent comme le montre la figure 1.13.

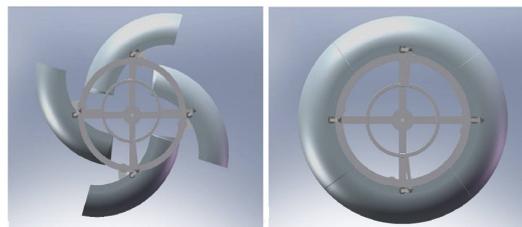


FIGURE 1.13 – illustration de l'auto-protection de l'éolienne BSB [9]

### Éolienne fouet

Un nouveau type d'éolienne verticale en forme de fouet de cuisine comme on le voit dans la figure 1.14 et en théorie trois fois plus puissante qu'une éolienne classique à pales. La conception verticale unique de l'engin oblige une rotation des pales plus lente que la vitesse de rotation habituelle. Ceci permet à la turbine de capturer plus d'énergie des courants d'air turbulents très communs dans les environnements urbains (en plus d'être plus silencieuse). Cette éolienne permet également de générer plus d'énergie que

les modèles domestiques actuels. Les éoliennes domestiques de la même taille produisent environ 0,4 kW avec un vent de 12 m/s. L'éolienne de Storan devrait plutôt produire trois fois plus d'électricité (1,2 Kw). Son design ingénieux est basé sur des matériaux ultra-légers aussi un caractère extrêmement stable. Ceci rend également l'éolienne beaucoup plus facile à installer.

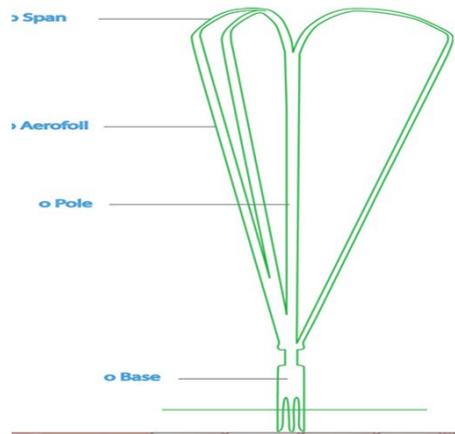


FIGURE 1.14 – éolienne à fouet [10]

### Éolienne à double rotor

C'est un nouveau type d'éolienne développé récemment, plus efficace que les éoliennes conventionnelles (avec un seul rotor). Elle est composée d'un rotor principal et d'un autre secondaire plus petit que le premier (voir la figure 1.15).



FIGURE 1.15 – éolienne à double rotor [11]

La contre rotation offre plus de stabilité que les éoliennes traditionnelles. Ce système permet un gain de 20 à 30% d'énergie supplémentaire que les modèles classiques. Il peut produire jusqu'à 43.5% d'électricité additionnelle annuellement [11].

# Chapitre 2

## Conversion éolienne-électrique

### 2.1 Rendement des éoliennes multi-rotors

Pour augmenter le rendement des éoliennes, plusieurs recherches ont été menées. Lors de ces travaux, les chercheurs se sont intéressés à optimiser les pales et augmenter la dimension des éoliennes.

Dans ce qui suit, on va exposer une autre voie d'optimisation des éoliennes qui est l'approche multi-rotors. On admet les hypothèses suivantes :

- Les rotors ont le rendement maximal de Betz : 59%
- Les pertes entre deux rotors successifs sont négligeables

On suppose qu'on a une éolienne de  $n$  rotors en cascade :

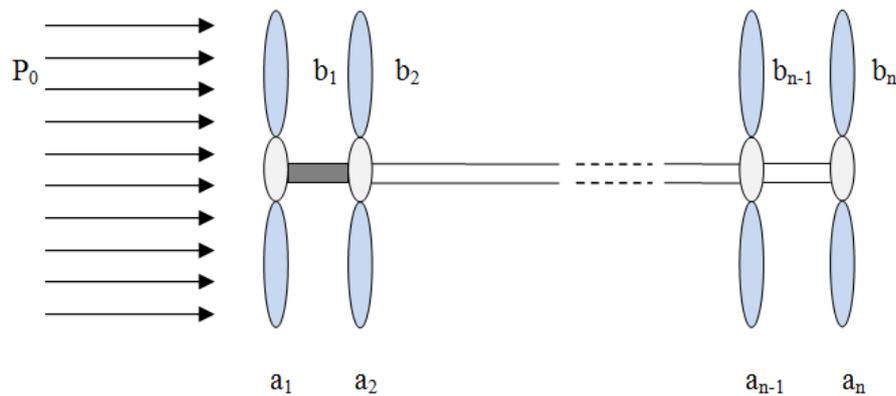


FIGURE 2.1 – Configuration à  $n$  rotors

$a_i$  est la puissance du vent extraite par le rotor  $i$ ,  $b_i$  est la puissance du vent disponible à la sortie du rotor  $i$

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 0.59P_0 \\
 a_2 &= 0.59b_1 \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 a_n &= 0.59b_{n-1}
 \end{aligned}$$

La puissance maximale totale extraite par l'aérogénérateur de  $n$  rotors, est donné par :

$$P = \sum_{i=1}^{i=n} a_i = \sum_{i=1}^{i=n} 0.59(0.41)^{i-1} P_0 = (1 - (0.41)^n) P_0 \quad (2.1)$$

Pour notre cas ( $n=2$ ), le rendement maximal est de 83.19%. On voit que la limite d'extraction de cet aérogénérateur est augmentée de 40.38%.

## 2.2 L'éolienne double rotor

### 2.2.1 Chaîne de conversion mécanique

Cet aérogénérateur est composé de deux rotors contre-rotatifs. Le rotor avec des hélices de grand rayon est dit principal, il est relié à l'arbre de transmission lent. Il développe un grand couple vu la grande surface qu'il balaye. Par conséquent, il produit la grande partie de l'énergie d'où la nomination principale.

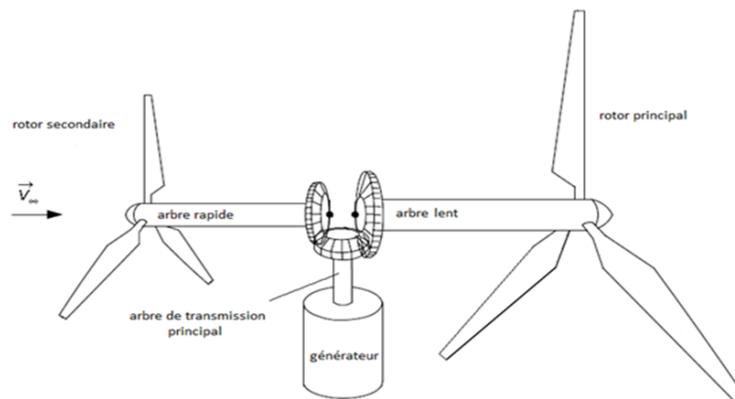


FIGURE 2.2 – Chaîne cinématique de l'éolienne [12]

Par contre le petit rotor est dit secondaire connecté à l'arbre rapide. Il développe un couple moins important que le précédent mais il tourne à une vitesse plus élevée. Les deux arbres se terminent par un engrenage conique qui assure l'addition des puissances (un système différentiel) comme on le voit dans la figure 2.2.

Cette structure peut être représentée par le modèle dynamique de la figure 2.3 :

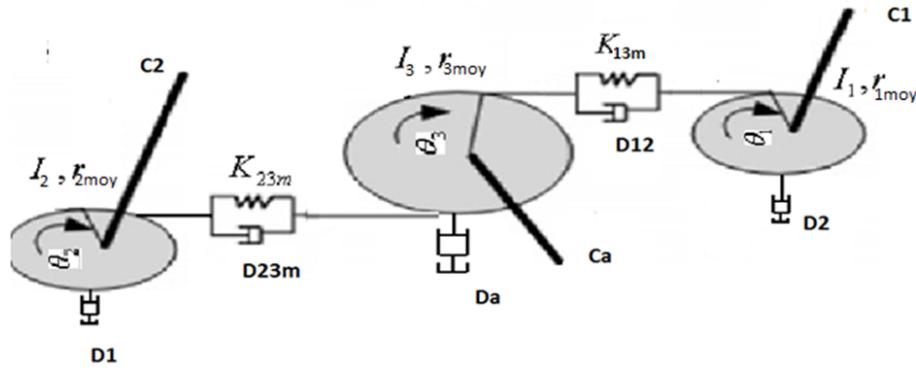


FIGURE 2.3 – Modèle dynamique de l'éolienne double rotor [12]

d'où les équations suivante [13] :

$$I_1 \ddot{\theta}_1 + r_{1moy} K_{m12} (r_{1moy} \theta_1 + r_{3moy} \theta_3) + F_1 = C_1 - D_1 \dot{\theta}_1 \quad (2.2)$$

$$I_2 \ddot{\theta}_2 + r_{2moy} K_{m23} (r_{2moy} \theta_2 + r_{3moy} \theta_3) + F_2 = C_2 - D_2 \dot{\theta}_2 \quad (2.3)$$

$$I_1 \ddot{\theta}_3 + r_{3moy} K_{m12} (r_{1moy} \theta_1 + r_{3moy} \theta_3) + F_3 + F_4 = C_a - D_{m3} \dot{\theta}_3 \quad (2.4)$$

avec :

$$F_1 = r_{1moy} D_{m12} (r_{1moy} \dot{\theta}_1 + r_{3moy} \dot{\theta}_3)$$

$$F_2 = r_{2moy} D_{m12} (r_{2moy} \dot{\theta}_2 + r_{3moy} \dot{\theta}_3)$$

$$F_3 = r_{3moy} K_{m32} (r_{2moy} \theta_2 + r_{3moy} \theta_3)$$

$$F_4 = r_{3moy} D_{m12} (r_{1moy} \dot{\theta}_1 + r_{3moy} \dot{\theta}_3) + r_{3moy} D_{m23} (r_{2moy} \dot{\theta}_2 + r_{3moy} \dot{\theta}_3)$$

Le coefficient de raideur est donné par la relation suivante :

$$K = \frac{K_{max}(\varepsilon - 1)T_{rd} + K_{min}(2T_{rd} - \varepsilon)}{T_{rd}} \quad (2.5)$$

avec :

$$K_{min} = \frac{\pi EL}{4(1 - v^2)}; K_{max} = 2K_{min} \quad (2.6)$$

Le coefficient d'amortissement est donné par la relation suivante [13] :

$$D = 2\xi \sqrt{\frac{\varepsilon_{conique} K_{min} I_a I_e}{I_a r_{am}^2 + I_e r_{em}^2}} \quad (2.7)$$

Le vent à la sortie du rotor principal subit un amortissement, ainsi qu'une turbulence. On

peut caractériser ce phénomène par des pertes de charge données par l'équation suivante [13] :

$$v_x = v_2 \left( 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - CT}}{2} \left( 1 + \frac{2x}{\sqrt{1 + 4x}} \right) \right) \quad (2.8)$$

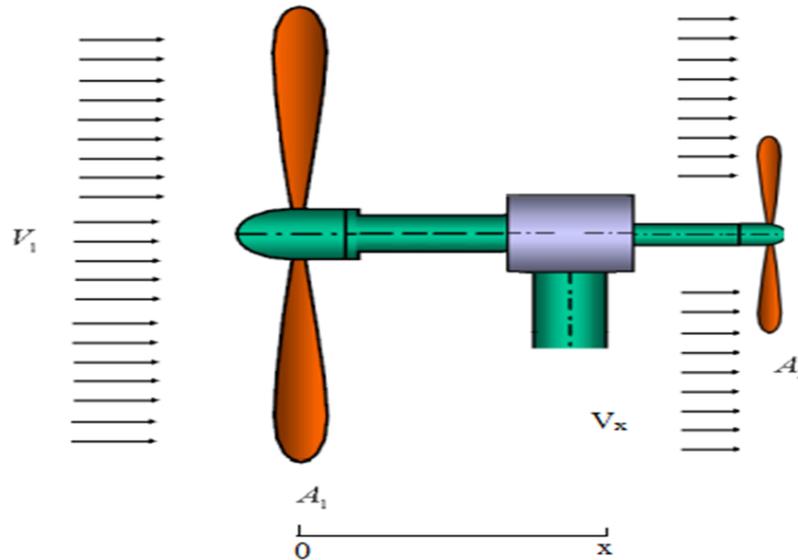


FIGURE 2.4 – distribution du vent dans l'aérogénérateur a double rotors

Si on néglige les pertes de charges au niveau du rotor principal, la vitesse du vent en aval  $V_2$  est donnée par l'équation suivante :

$$v_2 = \sqrt{(1 - C_p)v_1} \quad (2.9)$$

### 2.2.2 Rendement

Dans la simulation, le rendement est exprimé par le coefficient de puissance  $C_p$ . Pour pouvoir estimer le rendement de cette éolienne, nous avons effectué les simulations représentées par les schémas ci-dessous (figure 2.5). Nous avons traduit les équations présentées précédemment en blocs de simulation dans MATLAB- SIMULINK. Dans ce schéma nous avons utilisé un générateur de vent du vent variable qui est directement relié à un bloc qui calcul le  $C_p$  du rotor principal. Un bloc de turbulence est alimenté par le vent variable et le  $C_p$  du rotor principal pour pouvoir calculer la vitesse du vent en aval du rotor principal. Une fois le vent en aval est obtenu, on calcul le  $C_p$  du rotor secondaire. L'étape suivante consiste au calcul des couples développés par chaque rotor, les résultats obtenus seront transféré à un bloc qui devise la somme des deux couple obtenus sur la puissance totale délivrée par le générateur du vent. Après simulation nous avons obtenu les résultats qui figurent dans le graphe de la figure 2.6.

Ce schéma englobe les phénomènes de turbulence du vent entre les deux rotors, ainsi que les pertes au niveau du raccordement différentiel. La figure 2.6 représente la puissance

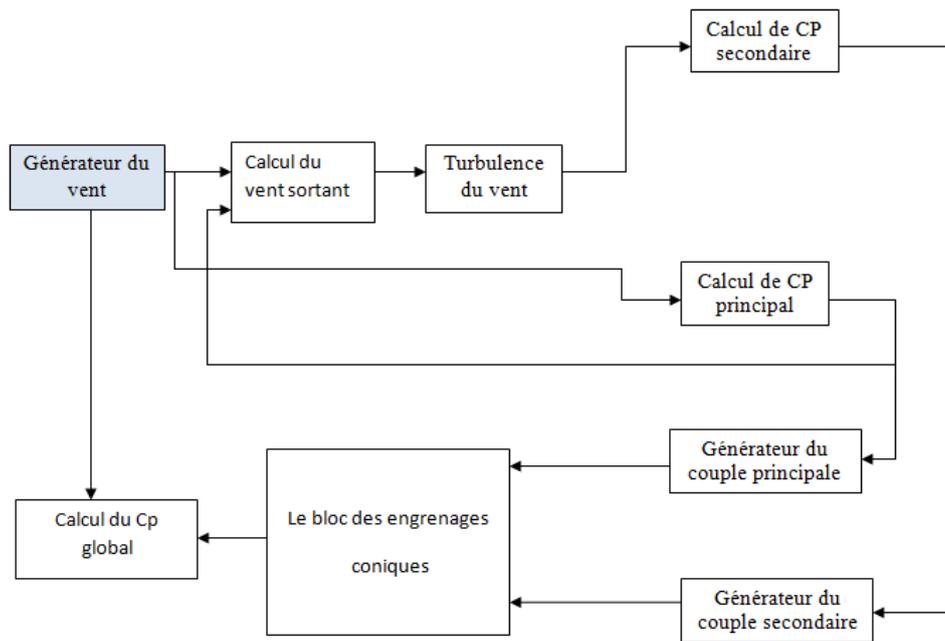


FIGURE 2.5 – Schéma de simulation pour le calcul de  $C_p$

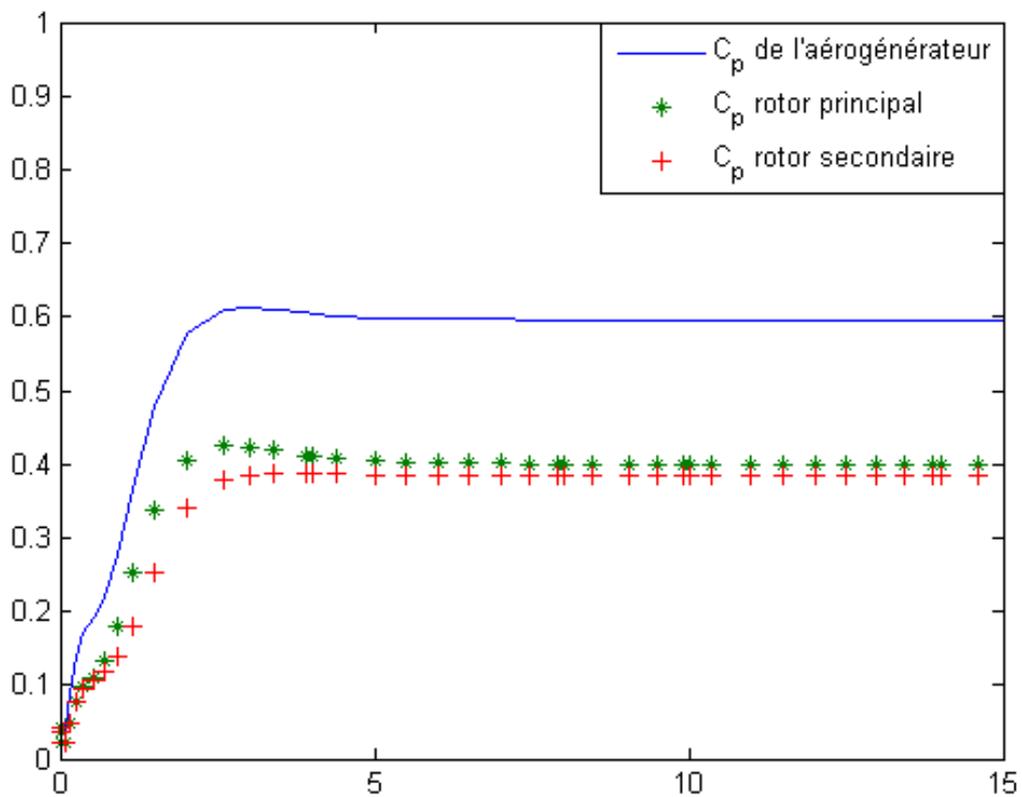


FIGURE 2.6 – Courbe des différents  $C_p$

extraite par chaque rotor.

On remarque que le rendement de la turbine double rotor a augmenté considérablement par rapport à celui de l'éolienne à simple rotor. Le rendement de l'éolienne double est de 61.62% alors qu'il n'est que de 42.63% pour le rotor principal, ce qui représente une amélioration de 44.55%.

Après une série de tests, nous avons pu obtenir plusieurs points de la courbe  $C_p = f(\lambda)$  donnée par l'équation 2.10, représenté dans la figure 2.7.

$$C_p(\lambda) = -1,8 \cdot 10^{-5} \lambda^6 + 6 \cdot 10^{-4} \lambda^5 - 0,0071 \lambda^4 + 0,0334 \lambda^3 - 0,052 \lambda^2 + 0,1031 \lambda + 0,0274 \quad (2.10)$$

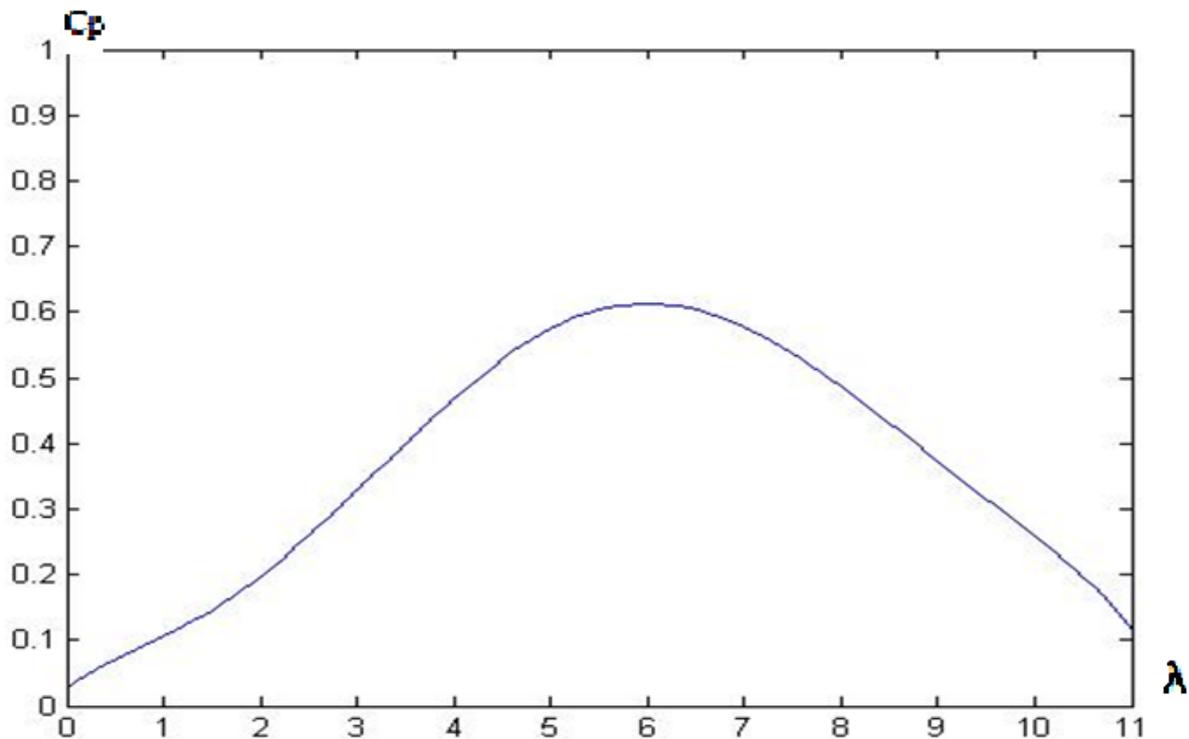


FIGURE 2.7 – Courbe du coefficient de puissance  $C_p$

On remarque que le rendement atteint son maximum pour un ratio de vitesse ( $\lambda$ ) qui se situe entre 6 et 7. Pour de faibles valeurs du rapport de vitesse, cette voilure atteint un rendement comparable au rendement maximum des éoliennes classiques.

## 2.3 Génératrices éoliennes

Les éoliennes ont pour objectif de convertir l'énergie du vent (non exploitable directement) en énergie utile (mécanique, hydraulique, électrique). La plupart des applications actuelle utilisent l'éolien pour la production de l'électricité en employant des génératrices. Il existe plusieurs types de génératrices.

### 2.3.1 Génératrice asynchrone

#### GAS à cage d'écureuil

Ce type de machine est de loin le plus utilisé dans les parcs éoliens. Cette génératrice est composée d'un stator bobiné fixe et d'un rotor composé de barres en cuivre qui sont court-circuitées par deux anneaux soudés lui donnant la forme d'une cage.

Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine, ainsi que la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. L'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée, mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (Figure 2.9). La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante, raccordées directement au réseau électrique comme le montre la figure 2.8. Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible [1].

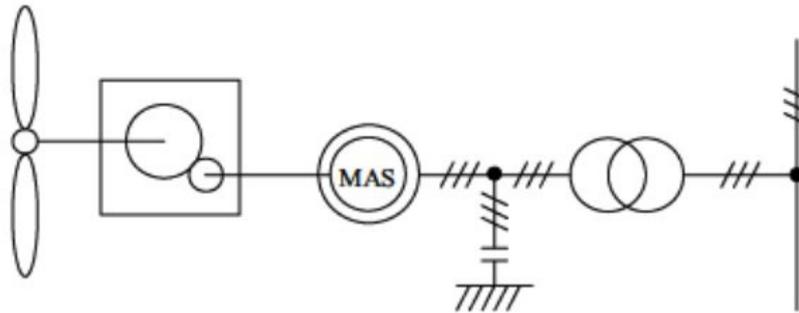


FIGURE 2.8 – Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)[1]

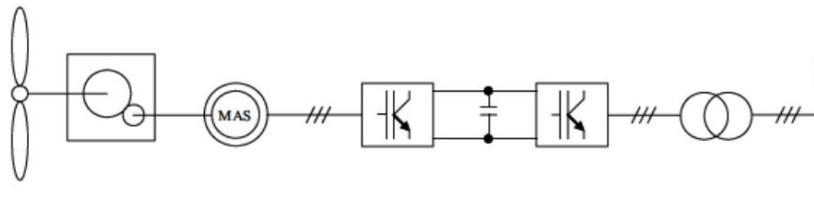


FIGURE 2.9 – Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable[1]

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage est uniquement utilisée dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée

au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées [14].

### GAS à rotor bobiné

Avec les générateurs asynchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable [14], Grâce à un système de bagues et balais, la tension appliquée au rotor peut être commandée par un convertisseur d'électronique de puissance. De l'énergie pouvant ainsi être appliquée ou extraite du rotor, le générateur peut se magnétiser par le rotor comme par le stator[6].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...)utilisent ce type de machines. Les vitesses de rotation nominales de ces machines sont d'habitude un peu moins élevées par rapport aux machines à cage d'écureuil par conséquent le rapport de multiplicateur de vitesses peut être moins important. La figure 2.10 montre la technologie (Optislip de Vestas) qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotorique. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotor dans les éléments résistifs. Une autre solution très intéressante et permettant d'obtenir une variation de la

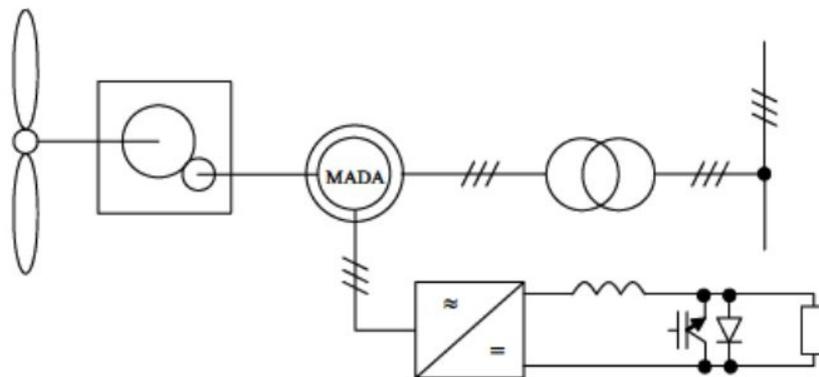


FIGURE 2.10 – Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor[1]

vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau (figure 2.11 ). En général, le dimensionnement de la chaîne rotorique se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage

de vitesse. C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau. Le système le plus compétitif n'est pas clairement identifié : la solution

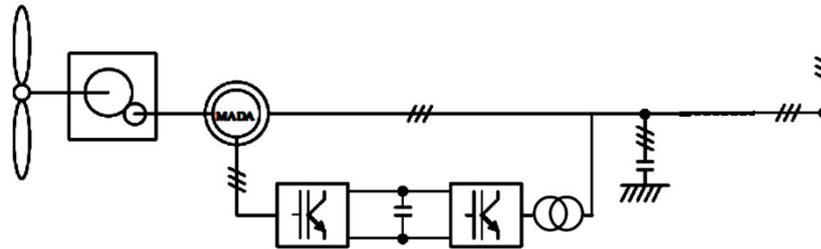


FIGURE 2.11 – Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation-régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation [1]

asynchrone à double alimentation avec multiplicateur offre un excellent compromis coût /masse /efficacité /fiabilité mais les développements technologiques prévisibles et les diminutions des coûts (interrupteurs de fortes puissance : IGBT, IGCT, aimants permanents, ...) feront davantage évoluer les systèmes à générateurs asynchrones à attaque directe.

### 2.3.2 Génératrice Synchronne

C'est le type de machine qui est utilisé dans la majorité des procédés traditionnels de production d'électricité. On la retrouve particulièrement dans les installations de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de  $500kW$  à  $2MW$  utilisés dans le domaine éolien, sont plus chers que les générateur à induction de la même taille.

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. Par contre, la possibilité de réglage de l'inducteur de ces machines offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. Le couplage direct sur le réseau est proscrit car étant beaucoup trop rigide [1].

#### GS a aimant permanent

La caractéristique d'auto excitation de la génératrice synchronne à aimants permanents lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants

et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif [6]. La figure 2.12 montre le couplage de la génératrice avec le réseau à travers une électronique de puissance (redresseur-bus continu-onduleur).

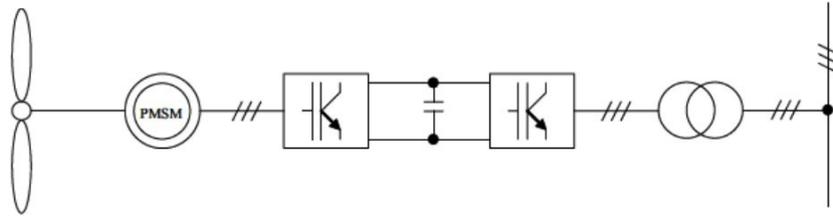


FIGURE 2.12 – Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [1]

### GS à rotor bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que le GS tourne à vitesse constante. Elle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. La mise en oeuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable.

Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système.

La figure 2.13 désigne la chaîne de puissance d'une GSRB avec un convertisseur de fréquence au niveau du stator et un hacheur au niveau de rotor pour la commande de l'inducteur, et ainsi optimiser la puissance de la génératrice.

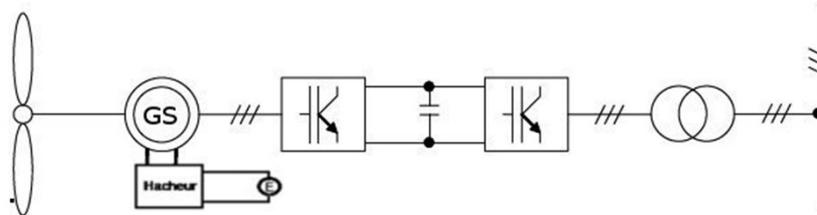


FIGURE 2.13 – Système éolien basé sur la machine synchrone à roue polaire [1]

### 2.3.3 Types de Machines électriques pour les petites éoliennes

Trois types de machines électriques se retrouvent principalement dans une éolienne de petite taille ( $< 20kW$ ) : l'alternateur à aimants permanents, la génératrice à courant continu et l'alternateur à excitation bobinée sans balai.

Dans les alternateurs à aimants permanents, le champ magnétique créé par les aimants est constant. Ces alternateurs sont beaucoup plus légers que les autres types de générateurs. Les alternateurs à aimants permanents produisent un courant et une tension

de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation (varie elle-même avec la vitesse du vent dans le cas d'une éolienne). Ainsi, un matériel électrique conçu pour fonctionner à la fréquence du réseau ne peut pas être connecté directement à l'alternateur d'une éolienne. Il est nécessaire de passer par un convertisseur de fréquence. En général, on utilise un redresseur et un onduleur. La tension intermédiaire délivrée par le redresseur étant de nature continue, un stockage d'énergie sous forme de batterie est envisageable.

La génératrice à aimants permanents est simple et présente un bon rendement. Dans plusieurs éoliennes de petite taille, les aimants tournent autour du stator situé au centre de la machine. Il est possible d'immobiliser le rotor en présence de vents modérés de façon à réaliser la maintenance de la turbine.

Cependant, contrairement aux alternateurs à aimants permanents dans lesquels l'induction d'excitation demeure constante, l'induction magnétique dans l'alternateur à rotor bobiné peut être modulée selon la vitesse du vent pour une utilisation optimale de l'éolienne.

Un avantage des alternateurs à inducteur bobiné est leur capacité de démarrage à des vents faibles. Ceci s'explique par le fait qu'il n'y a presque pas de flux magnétique développé par l'inducteur, donc une très faible résistance au mouvement pour l'armature en rotation. L'induction magnétique peut être augmentée au fur et à mesure que le vent se renforce. En conséquence, la génératrice à rotor bobiné permet de délivrer une puissance évoluant comme le cube de la vitesse du vent. Les alternateurs à aimants permanents présentent une induction magnétique constante quelle que soit la vitesse de rotation du rotor. Le rotor est donc plus difficile à démarrer et l'alternateur n'est performant que dans une gamme limitée de puissance. Les autres points de fonctionnement ne correspondent qu'à des compromis lors du dimensionnement, ce qui est particulièrement pénalisant en cas de vents moyens ou faibles, c'est-à-dire le plus souvent pour une éolienne.

Quant aux alternateurs à excitation sans balais, ils cumulent les avantages des deux types de machines. Ils possèdent un inducteur bobiné et n'ont pas de balais. Cependant, comparativement aux alternateurs à aimants permanents, les alternateurs sans balais sont plus complexes. Ils sont plus coûteux, à l'achat comme à l'entretien.

### 2.3.4 Tableau récapitulatifs

A présent, et pour mieux nous situer à travers toutes ces configurations, nous allons classer ces différentes génératrices dans un tableau avec chacune ces avantages et ces inconvénients.

génératrices	avantages	inconvénients
génératrice asyn- chrone à cage	<ul style="list-style-type: none"> <li>– robuste, économique</li> <li>– facilité de couplage au réseau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– consommation d'énergie réactive</li> <li>– puissance extraite non optimisé</li> <li>– magnétisation imposé par le réseau</li> <li>– problème de décrochage du réseau</li> <li>– rendement inférieur par rapport à la GS</li> </ul>
génératrice asyn- chrone double alimen- tation	<ul style="list-style-type: none"> <li>– agir sur les grandeurs rotorique (fonctionnement à vitesse variable)</li> <li>– dimensionnement de l'EDP à 30% de la <math>P_N</math></li> <li>– une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau</li> <li>– découplage de la puissance active et réactive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– présence de bagues et de balais</li> <li>– prix de la boite de vitesse et frais de maintenance</li> <li>– commande complexe</li> </ul>
génératrice synchrone à aimant permanent	<ul style="list-style-type: none"> <li>– dispense d'alimenter un rotor tournant</li> <li>– fonctionnement à vitesse variable et optimisation de l'énergie</li> <li>– possibilité d'absence de boite de vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– absence de réglages de l'excitation</li> <li>– risque de démagnétisation</li> <li>– cout élevé des aimants</li> <li>– EDP dimensionnée pour la <math>P_N</math></li> </ul>
génératrice synchrone à roue polaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>– démarrage à vent faible</li> <li>– optimisation de la puissance de la génératrice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– complexité de fabrication</li> <li>– poids plus élevé par rapport à une MSAP</li> </ul>

TABLE 2.1 – Comparaison entre les différentes génératrices

## 2.4 Conversion électrique

L'énergie électrique fournie par notre génératrice est très variable ceci est du principalement à la nature intermittente de notre source d'énergie (le vent). Dans ce cas de figure, on ne peut pas utiliser directement la puissance extraite du vent sans un traitement au préalable. Dans cette partie nous allons voir les principales technologies qui existent dans le domaine de la conversion d'énergie électrique et de l'électronique de puissance, et essentiellement pour les génératrices synchrones.

Généralement, l'étage de conversion AC/AC est soit un convertisseur Matricielle, ou bien un double étage (redresseur (AC/DC)-bus continue-onduleur (DC/AC)). Dans notre étude, on s'intéressera à la deuxième configuration. En ce qui concerne les redresseurs, les technologies les plus utilisées sont :

- Pont triphasé à diode.
- Pont triphasé à diode + Hacheur.
- Redresseur de thyristors.
- Redresseur à MLI.

### 2.4.1 Pont triphasé à diode

Cette première stratégie consiste à convertir directement la tension alternative de la génératrice en tension continue. Pour le cas triphasé, le pont à diode est composé de trois bras avec chacun deux diode montées en série. Chaque bras est raccordé avec une phase de la génératrice (figure 2.14).

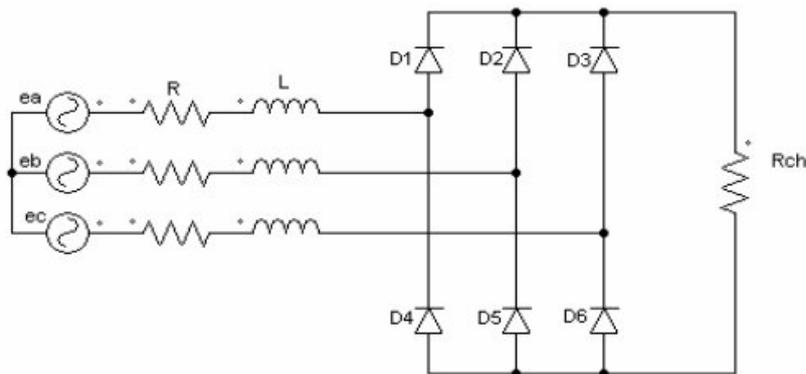


FIGURE 2.14 – Pont de diodes triphasé : [15]

Le problème de conduction ne se pose pas, lors que nous utilisons des génératrices qui fournissent des tensions assez élevées. La tension de sortie du redresseur est exprimée par la relation :

$$U_{dc} = \max(V_a, V_b, V_c) - \min(V_a, V_b, V_c). \quad (2.11)$$

La figure 2.15 illustre l'allure de la tension en sortie du dispositif de conversion. Les tensions appliquées à l'entrée sont triphasées avec :  $V_{eff} = 220V$  et  $f = 50Hz$ .

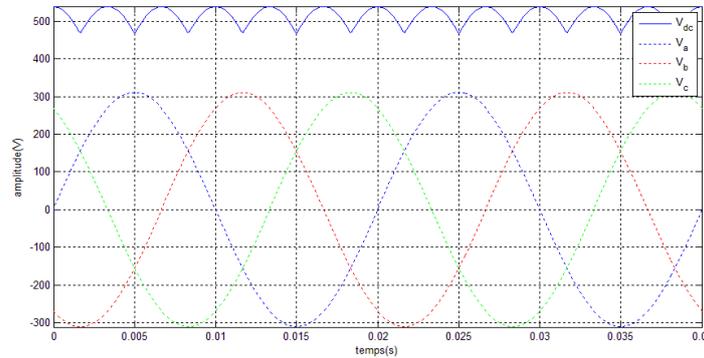


FIGURE 2.15 – Tensions triphasées et la tension redressée en aval de redresseur.

On remarque que la tension redressée a une fréquence six fois supérieure à la fréquence de la source, ceci est dû à la double alternance des diodes. Ce qui est caractéristique d'une tension en aval d'un redresseur est sa valeur moyenne. Pour la calculer, on prend une période de conduction d'une des diodes. La valeur moyenne s'exprime comme suit :

$$U_{moy} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{eff} \tag{2.12}$$

En Ajoutant un filtre passe bas de type  $LC$  2.16 et une charge  $R$ , on aura la forme de tension suivante :

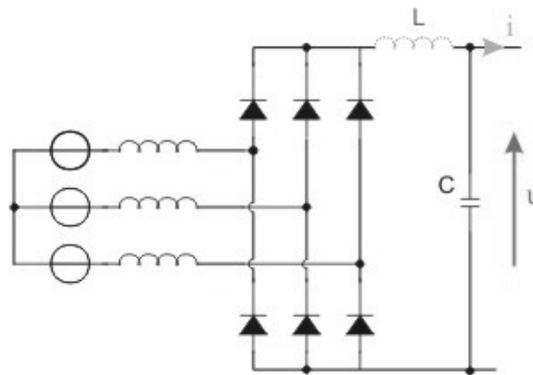


FIGURE 2.16 – Pont de diodes avec filtre  $LC$

On voit bien que la tension filtrée tourne aux alentours de la tension moyenne du redresseur  $V_{moy} = 514V$ .

Pour ce qui est des courants, tout dépend des instants de conduction des diodes. Si on appelle  $I_0$  le courant qui passe en sortie du redresseur et  $I_a$  le courants qui passe dans la phase a. La figure 2.18 illustre la forme du courant pour une période.

Après que la tension soit redressée par le pont de diode et qu'elle soit filtrée pour lisser la tension, il reste néanmoins que cette tension est variable et nécessite d'être fixé a une

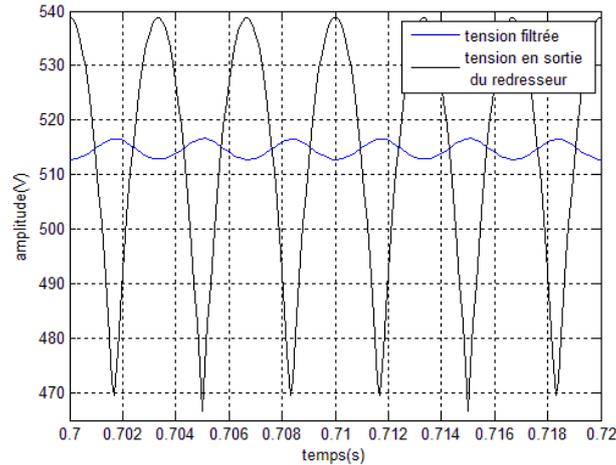
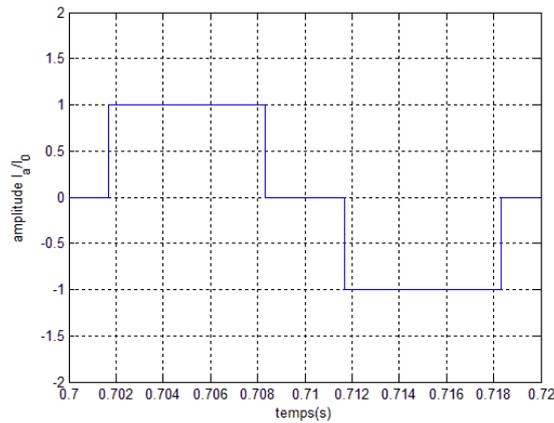


FIGURE 2.17 – tension du redresseur et la tension aux bornes de la charge

FIGURE 2.18 – courant  $I_a/I_0$  dans la phase a.

certainne valeur, que ce soit pour le stockage dans une batterie (12V, 24V, ou autre), et bien vers un condensateur, ou un bus continu (figure 2.19) pour qu'elle soit ensuite envoyée vers un onduleur pour convertir la tension continue en tension alternative triphasée. L'énergie produite pourra être utilisée dans un site isolé, ou bien l'injecter directement dans le réseau.

Certains auteurs comme Miguel Lopez[6], n'ont pas utilisé un deuxième étage de conversion. L'auteur a opté pour une petite éolienne à axe verticale avec transformateur, pont de diode et une batterie. Le but de son étude était de trouver le meilleur moyen d'extraire le maximum de puissance du vent sans utiliser d'électronique de puissance. Il a étudié les différentes configurations en choisissant la bonne tension de batterie, le bon rapport de transformation pour le transformateur et choisir la bonne voilure pour l'éolienne de sorte à avoir une bonne adaptation entre les éléments constituant la chaîne de conversion.

Dans notre cas si on veut stocker l'énergie dans une batterie, un hacheur abaisseur

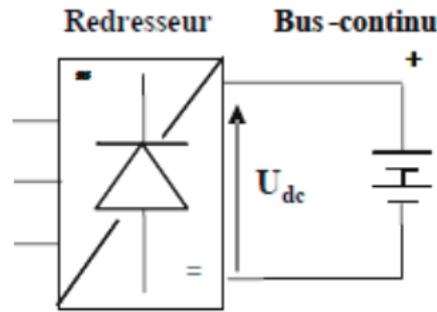


FIGURE 2.19 – Connexion direct pont de diode, Bus-continue.

suffirait pour faire la conversion DC/DC étant donné que la tension fournie par la génératrice est assez élevée. La figure 2.20 montre le schéma du hacheur Buck (abaisseur)

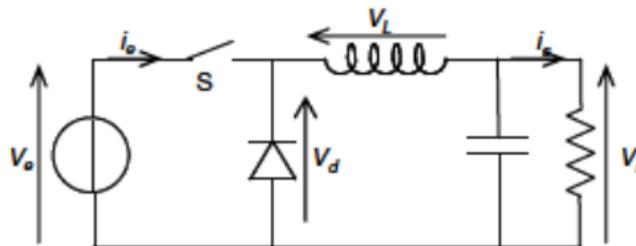


FIGURE 2.20 – Hacheur abaisseur.

En agissant sur le rapport cyclique, on pourra fixer la valeur de la tension de sortie à la valeur désirée avec la relation :

$$V_e = \alpha V_s \tag{2.13}$$

Si on veut emmagasiner l'énergie électrique dans une batterie avec une tension plus élevée ou bien dans un bus continu pour la transformer ensuite en tension triphasée, plusieurs auteurs ont proposé d'utiliser un hacheur de type Buck-Boost (abaisseur-élevateur), cela permet de fixer une tension sur le bus continu ou la batterie même si la tension d'entrée du hacheur est inférieure à celle de la sortie. La figure 2.21 illustre la composition de ce convertisseur.

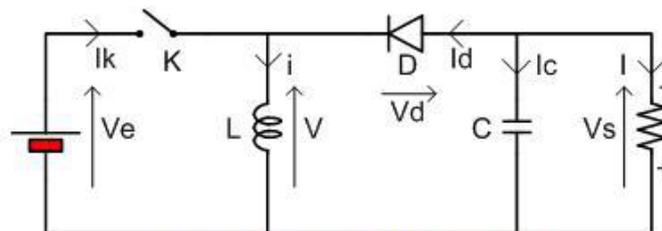


FIGURE 2.21 – Hacheur Buck-Boost.

La relation entre la tension d'entrée et de sortie en fonction de rapport cyclique est

donnée comme suit :

$$V_s = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_e \quad (2.14)$$

Cela veut dire que si :

- $\alpha < 0.5$ , le hacheur se comporte comme en abaisseur de tension.
- $\alpha > 0.5$ , le hacheur se comporte en élévateur de tension.

Cette fonctionnalité s'avère très utile lorsque le vent est très faible par moment et ne fournit pas une tension assez élevée pour atteindre la valeur de référence.

La figure 2.22 représente la variation du rapport de tension et le rapport cyclique.

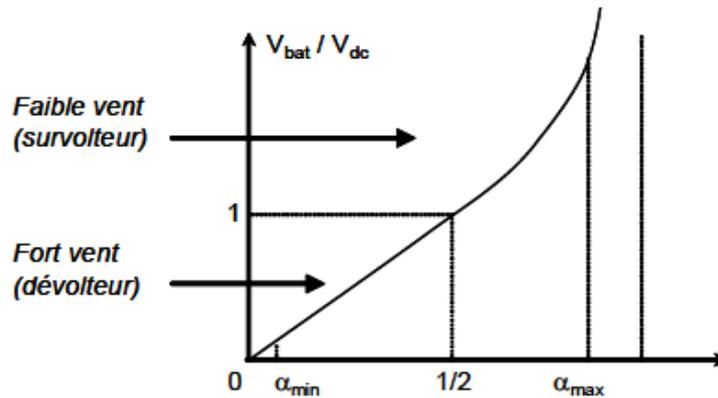


FIGURE 2.22 – Rapport de tension en fonction du rapport cyclique [1].

Comme on voit sur la courbe 2.22, plus le vent diminue, plus le rapport cyclique augmente et ainsi le rapport de tension croît pour garder la même tension à la sortie.

Dans sa thèse, TRAN [16] a étudié plusieurs chaînes de conversion dédiées aux domaines du mini et petit éolien. Parmi ces configurations, on notera celle de DE.BROE[17] en 1999 qui se compose d'un pont de diode triphasé, d'un condensateur entre le convertisseur AC/DC et le hacheur survolteur et un accumulateur qui est une association de plusieurs batteries en série. La figure ci-dessous montre un schéma global de la conversion électrique.

L'électronique de commande utilise les deux tensions en entrée et en sortie du convertisseur DC/DC. Elle agit sur l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur (IGBT dans ce cas) et fixe la tension de la sortie en fonction de la tension aux bornes de la batterie.

## 2.4.2 Redresseur triphasée à thyristor

Comme pour les redresseurs à diodes, ces dispositifs permettent d'obtenir un courant continu dans la charge. Cependant, le niveau de tension moyenne de sortie sera réglable, en fonction du signal de commande envoyé sur les thyristors.

Comme on peut le voir sur la figure 2.24, ce redresseur a la même disposition qu'un pont de diode triphasé classique, la seule différence réside dans l'organe de commande. Chaque thyristor sera contrôlé séparément par une électronique de commande qui aura

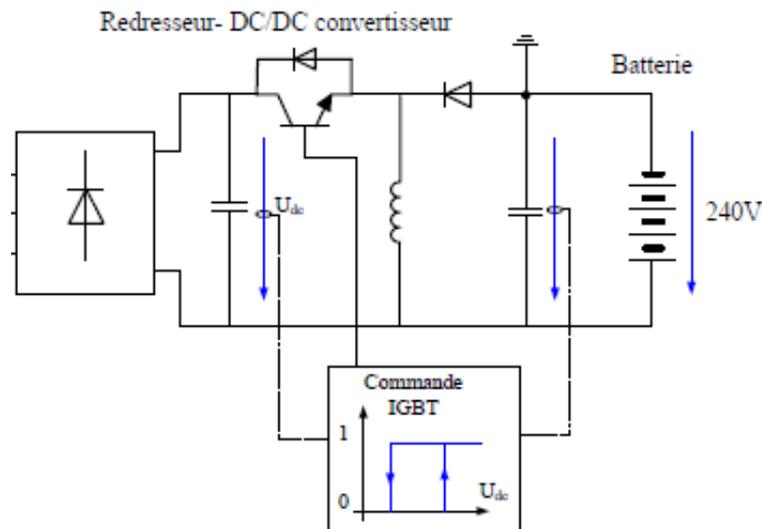
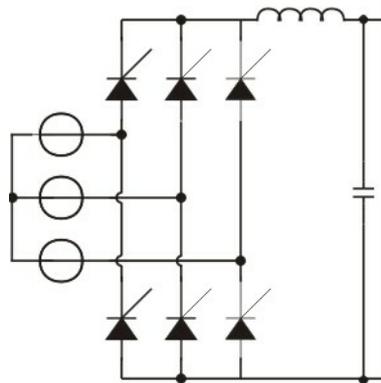


FIGURE 2.23 – Association pont de diode et hacheur survolteur [16].

FIGURE 2.24 – Redresseur à thyristor avec filtre  $LC$ .

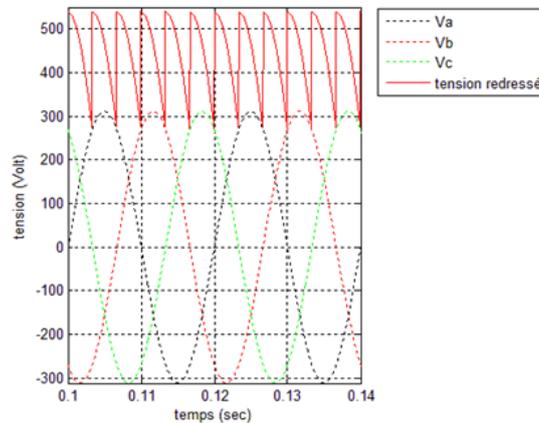
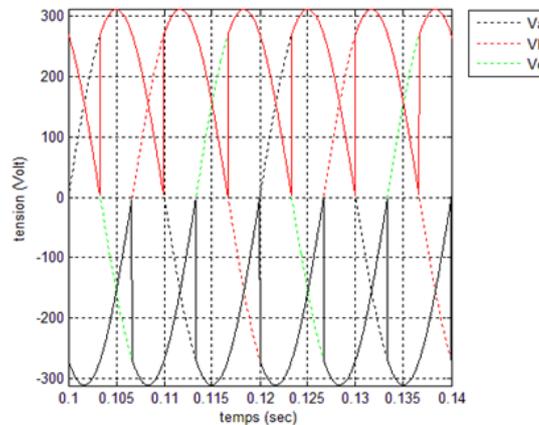
pour objectif de réguler la tension de la batterie ou du bus-continu. La commande agit directement sur l'angle d'amorçage des thyristors  $\alpha$ , celui-ci est compris entre 0 et  $\frac{\pi}{2}$  pour un fonctionnement redresseur.

La commutation naturelle des thyristors se déroule à  $\theta = \frac{\pi}{6}$ , ce qui équivaut à un angle d'amorçage de  $\alpha = 0$  comme pour une diode, cette angle représente la tension maximum que peut fournir le redresseur. Afin de diminuer la tension en sortie du redresseur, il suffit d'augmenter  $\alpha$  sans dépasser l'angle de  $\frac{\pi}{2}$ .

Pour un système triphasé, La valeur moyenne de la tension est donnée par l'équation 2.15

$$U_{moy} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{eff} \cos \alpha \quad (2.15)$$

Les redresseurs commandés à thyristor sont en voie d'obsolescence et sont avantageusement remplacés par la mise en cascade d'un redresseur non commandé et d'un hacheur.

FIGURE 2.25 – Tension redressée avec  $\alpha = \frac{\pi}{6}$ FIGURE 2.26 – Redressement avec  $\alpha = \frac{\pi}{6}$ 

D'une part, la commande d'un transistor à effet de champ ou d'un IGBT est beaucoup plus simple que celle d'un thyristor et d'autre part, les fréquences de fonctionnement des hacheurs qui dépassent aujourd'hui les  $200\text{KHz}$  permettent d'adapter le rapport cyclique du hacheur pour obtenir une régulation de la tension de sortie. Cette propriété permet d'obtenir une tension de sortie constante sans être contraint d'ajouter un condensateur de forte capacité [18].

### 2.4.3 Redresseur MLI

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée [15]. Pour permettre la continuité de la circulation du courant dans les inductances de la machine et éviter de dangereuses surtensions, il faut associer chaque

interrupteur actif à une diode montée en "tête- bêche".

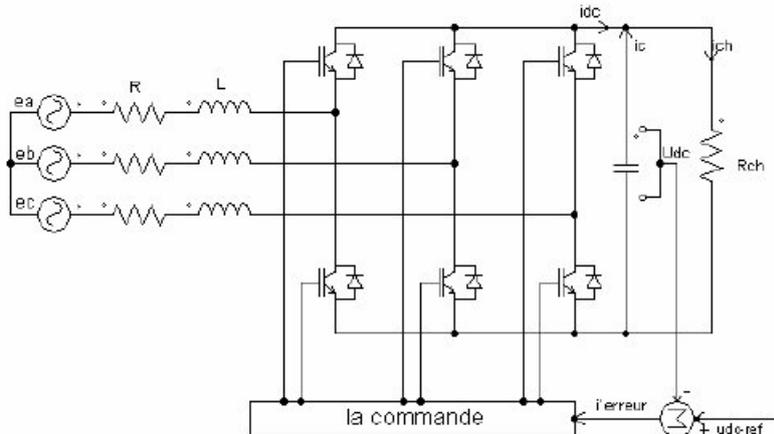


FIGURE 2.27 – Principe de commande en tension du redresseur MLI

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la figure 2.27. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu  $U_{dc}$  est mesurée et comparée avec une référence  $U_{dc-ref}$ , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu  $U_{dc}$  mesurée aux bornes du condensateur C [15].

Dans notre cas, on va utiliser le système dans un seul sens, du la source triphasée vers le condensateur. Pour commander le transistor, ainsi réguler la tension de sortie du redresseur, plusieurs méthodes existe parmi elles on peut citer :

**MLI a Bande d'hystérésis :**

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase [15].

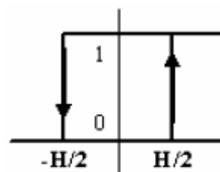


FIGURE 2.28 – Principe de Fonctionnement du Modulateur MLI à bande d'hystérésis

### MLI à porteuse triangulaire :

La méthode MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixes. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire (voir figure 2.29) [15].

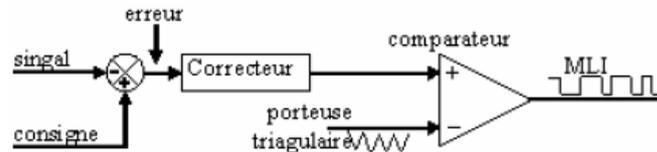


FIGURE 2.29 – Modulation MLI à porteuse triangulaire

### MLI vectorielle

Dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forment le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur.

La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras du redresseur en même temps [15]

Dans les systèmes éolien, le redresseur MLI est généralement associé à un onduleur qu'on appelle communément 'back to back converter'. Cette configuration est majoritairement dédiée aux éoliennes de grande puissance. L'avantage technique du convertisseur de tension à MLI vient du condensateur de découplage entre l'onduleur du côté réseau et le redresseur du côté génératrice : en plus d'offrir une certaine protection, ce découplage permet des contrôles séparés des deux convertisseurs [19]. Cette association comporte aussi des inconvénients notamment les pertes par commutation, son encombrement et son poids qui augmentent les coûts et réduisent la vie globale du système.

## 2.5 L'excitation de la génératrice [21]

### 2.5.1 Définition

Le courant d'excitation des machines synchrones est obtenu à partir d'un ensemble appelé système d'excitation comportant, dans la majorité des cas :

- la source de puissance proprement dite, fournissant la puissance d'excitation.
- le régulateur de tension, servomécanisme ayant, dans le cas le plus simple, pour grandeur de sortie une tension commandant la puissance délivrée par la source

d'excitation, pour la grandeur d'entrée, l'écart entre la tension aux bornes de la machine synchrone principale et une tension de consigne.

- éventuellement, des étages amplificateurs intermédiaires, intercalés entre le régulateur et la source de puissance.

Le système d'excitation se doit d'assurer les fonctions suivantes :

- assurer le réglage de tension dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire lorsque les conditions extérieures appliquées, et notamment la tension aux bornes, ne varient pas avec simultanément une grande amplitude et une grande rapidité. On considère dans ce cas le comportement du système d'excitation vis-à-vis des petites perturbations.
- contribuer au rétablissement de conditions normales de fonctionnement, à la suite de variations brutales et de grande amplitude, des conditions extérieures appliquées, et notamment de la tension aux bornes. On considère alors le comportement du système d'excitation vis-à-vis des grandes perturbations.

## 2.5.2 Différentes sortes de source de puissance [21]

Pour fournir le courant continu d'excitation d'une machine synchrone, il est nécessaire de disposer d'une source de tension continue, variable dans d'assez larges proportions [21]. Le choix de la source d'énergie est primordiale pour notre chaîne de conversion éolienne, il en vient tant pour l'aspect économique, complexité du système et de faisabilité.

Dans l'étude du système d'excitation intervient donc, d'une part, le choix des sources d'excitation, objet du présent paragraphe, et d'autre part, les moyens mis en œuvre pour faire varier le courant d'excitation. On peut distinguer trois grandes catégories de sources principales d'excitation :

- excitatrice à courant continu.
- alternateur-exciteur débitant sur redresseur.
- redresseur alimenté directement à partir des bornes de la machine synchrone principale (auto-alimentation).

Pour les deux premiers, la puissance est tirée à partir de l'arbre mécanique de la génératrice ou de l'alternateur alors que la troisième utilise directement l'énergie produite par le stator de la machine électrique.

### **excitatrice à courant continu :**

Pour le système excitatrice à courant continu, l'excitatrice doit nécessairement être munie d'un enroulement d'excitation séparée par lequel seront obtenues les variations de flux permettant la variation de sa tension aux bornes  $V_f$  [21].

L'excitatrice est généralement accouplée sur le même arbre que le rotor de la machine principale. Lorsque les conditions de puissance et de vitesse correspondent à une machine

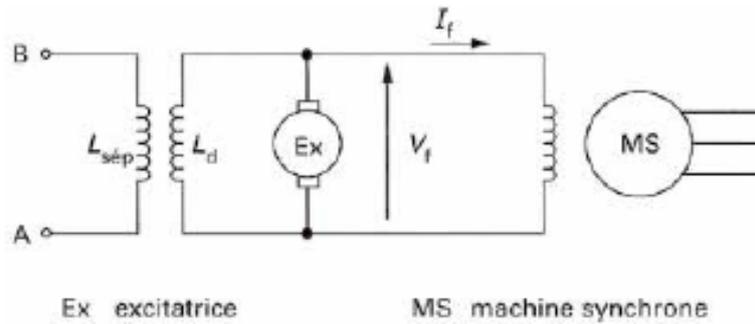


FIGURE 2.30 – Principe de l’excitation par machine à courant continu.

à courant continu difficilement réalisable, on peut soit utiliser un réducteur à engrenages, soit entraîner l’excitatrice par un moteur asynchrone, mais cette dernière solution est plus coûteuse et moins fiable [21]. Cette solution n’est pas vraiment adaptée pour des éoliennes de petite puissance.

**Alternateur-excitateur débitant sur redresseurs :**

Pour l’alternateur excitateur débitant sur redresseurs, deux variantes existent : à inducteur tournant et induit fixe ou bien l’inverse. Les deux configurations sont illustrées dans la figure ci-dessous.

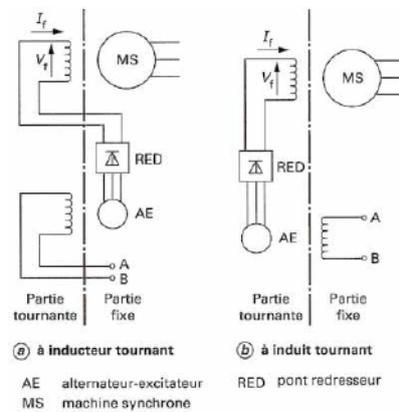


FIGURE 2.31 – Principe de l’excitation par alternateur-excitateur.

On remarque que la configuration (a) nécessite un système de bague pour acheminer le courant vers l’inducteur tournant contrairement à la configuration (b) qui est un avantage non négligeable.

Dans un certain grand nombre d’éoliennes de grande puissance utilisant la génératrice synchrone à roue polaire, la configuration à induit tournant est privilégiée, en utilisant comme source de puissance un redresseur alimenté par les phases statorique de la génératrice, ce qui s’apparente à un mélange auto-alimentation avec alternateur excitateur (voir figure 2.32).

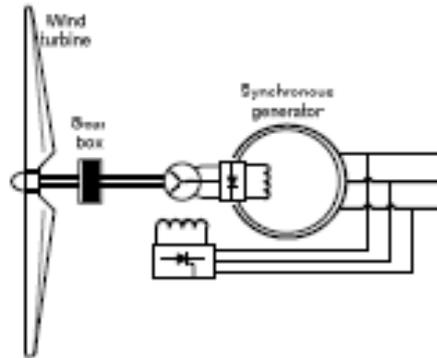


FIGURE 2.32 – Système éolienne avec alternateur-excitateur et Auto-alimentation [20].

Comme dit précédemment, le dispositif est plus approprié aux grandes éoliennes à cause de l'encombrement qu'il peut engendrer aux petites génératrices synchrones.

### L'auto alimentation :

On parlera essentiellement d'auto alimentation à dérivation pure, il s'agit d'un pont de thyristors alimentant l'enroulement inducteur qui est lui-même alimenté par un système de tensions alternatives par le secondaire d'un transformateur triphasé dont le primaire est connecté aux bornes de la machine synchrone principale [21] .

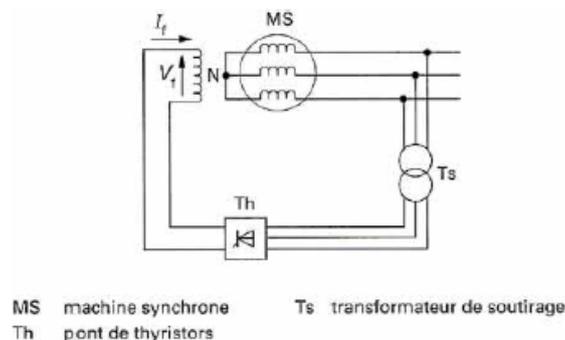


FIGURE 2.33 – Principe de l'excitation par auto-alimentation à dérivation pure

L'amorçage et la stabilité de ce système bouclé s'étudient de la même façon que pour une génératrice à courant continu à excitation en dérivation. En général, la tension, due au flux rémanent de la machine principale, est trop faible pour permettre l'amorçage (compte tenu de la chute de tension dans les thyristors), il faut donc utiliser une source auxiliaire [21]. On peut tout aussi bien remplacer le pont de thyristors par un pont de diode associé avec un hacheur abaisseur, en effet cette configuration est plus simple. Elle comporte un seul élément de commande dans le convertisseur DC/DC pour contrôler la tension  $V_f$ , contrairement au précédent qui comporte 6 interrupteurs, ce qui complique l'électronique de contrôle et diminue la durée de vie du système.

Comme le montre la figure 2.34, [22] ont proposé une structure qui est composée d'une VAWT posée sur une tour.

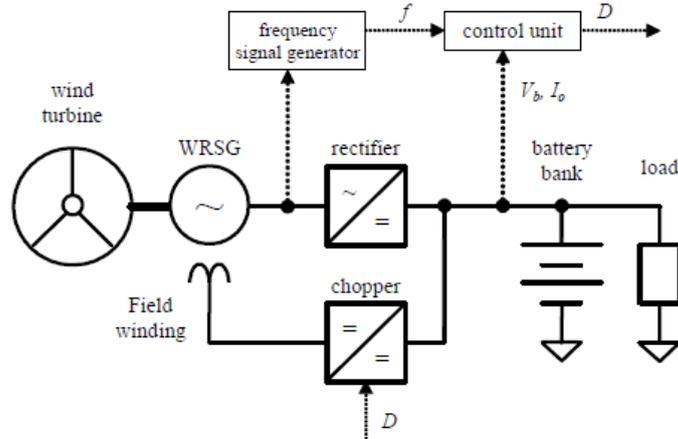


FIGURE 2.34 – Schéma simplifié de la structure de commande appliquée à des systèmes de faible puissance

Elle utilise un arbre de transmission de la longueur de la tour, accouplé à une machine synchrone bobinée (WRSG) qui est placée à la base de la tour. Le système comporte un bus DC pour le stockage d'énergie dans des batteries. Il sert aussi pour commander le circuit d'excitation de l'alternateur et pour fournir de l'énergie à la charge électrique du système en courant continu. Le générateur est spécialement conçu pour son application à un système isolé de faible taille. Pour la commande du WRSG, un convertisseur DC/DC est proposé qui commande le courant d'excitation. Les signaux captés ont la fréquence électrique du générateur, la tension et le courant fournis à la batterie et à la charge. Une unité de commande utilise le rapport cyclique du convertisseur DC/DC comme variable de commande pour ajuster la  $fem$  de la machine[6].

## 2.6 Les onduleurs

### 2.6.1 Généralités

Les onduleurs sont essentiellement utilisés pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication,...) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales éoliennes, centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,...). Ils sont constitués de :

- Une source de tension continue
- Un circuit de conversion DC/AC
- Un filtre  $LC$

Un onduleur triphasé est constitué de trois branches. Chaque branche représente une cellule de commutation réversible. Elle est composée au minimum de deux interrupteurs réversibles en courant mais pas en tension. Pour réaliser un interrupteur, on met en antiparallèle un transistor (ou autre composant de d'électronique de puissance) avec une diode. Les mécanismes de commutation de ces interrupteurs dépendent des caractéristiques de la charge et notamment de son facteur de puissance (courant en avance ou en retard de phase par rapport au terme fondamental de tension), ainsi que du type de commande et de réglage de l'onduleur [23].

### 2.6.2 Commande des cellules de commutation

Les éléments de commutation de chaque branche travaillent en intermittence. Deux types de commandes existent : Les commandes modulée et non-modulée. Pour La première, on a besoin d'une modulante qu'on compare avec une porteuse pour générer le signal de commande dans ce cas la commutation est forcée. Pour le second type, il n'y a pas de modulante ni de modulante ni de porteuse, dans ce cas la commande est continue. Dans ce cas on dit que la commutation est naturelle. Pour une cellule à commande non modulée dont le courant de charge est en avance de phase par rapport à la tension, les interrupteurs doivent être commandés à l'amorçage (AM) et posséder un blocage spontané comme on le voit dans la figure 2.35.

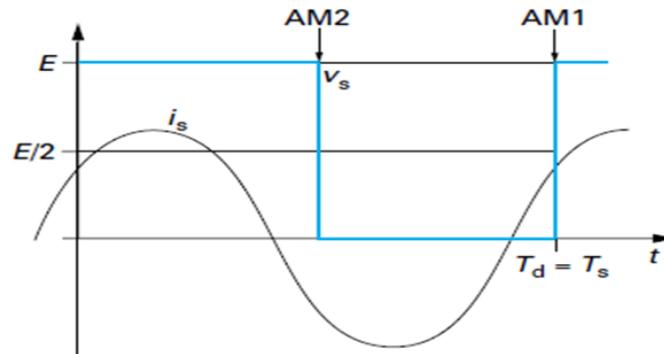


FIGURE 2.35 – Commande non modulée et avance de phase [23]

Inversement, pour une cellule à commande non modulée dont le courant de charge est en retard de phase par rapport à la tension, les interrupteurs doivent être commandés au blocage (BL) et posséder un amorçage spontané, ce qui est illustré dans la figure 2.36.

Enfin, pour une cellule à commande modulée, et quelque soit le déphasage du courant de charge par rapport à la tension, les interrupteurs doivent être commandables, à la fois, à l'amorçage et au blocage, la figure 2.37 montre bien la technique.

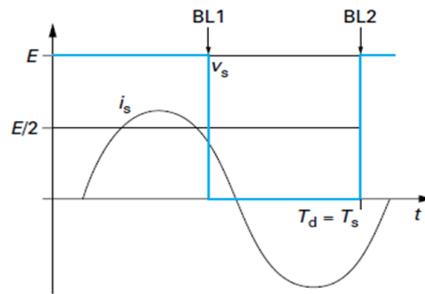


FIGURE 2.36 – commande non modulée et retard de phase [23]

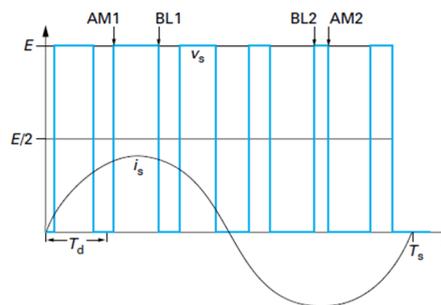


FIGURE 2.37 – Commande modulé [23]

### 2.6.3 Principe de la conversion continue-alternative

On distingue deux techniques principales. La première s’appuie sur l’utilisation directe de la cellule de base et consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d’impulsion (MLI ou PWM en anglais : pulse width modulation). Le schéma de base de cette technique est représenté dans la figure 2.38, le signal obtenu est montré dans la figure 2.39.

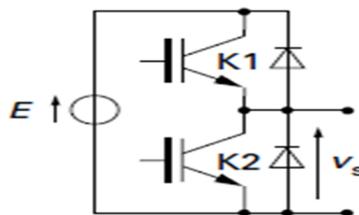


FIGURE 2.38 – Schéma de base d’onduleurs à MLI [23]

La deuxième technique est de contrôler l’amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l’existence d’un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d’un nombre suffisant de sources. Cela pourrait, entre autres possibilités, être réalisé par l’association de  $n$  cellules de base connectées en série, conformément au schéma de la figure 2.42. Le signal ainsi obtenu est illustré par la figure 2.43.

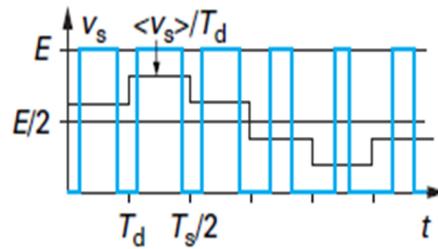


FIGURE 2.39 – Réglage par modulation d’impulsion [23]

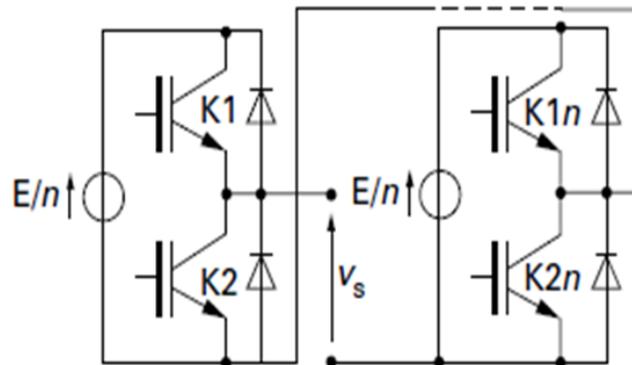


FIGURE 2.40 – Schéma de base d’onduleurs à niveau [23]

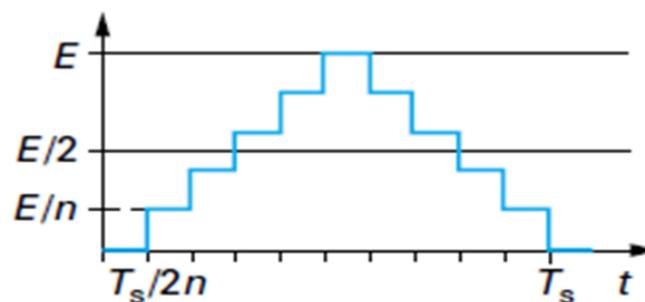


FIGURE 2.41 – Réglage par niveau de tension [23]

### 2.6.4 Commande MLI, principe de la commande triangle-sinusoïdale

La tension de sortie est composée de plusieurs créneaux de tension continue dont la largeur est variable (d’où la nomination modulation de largeur d’impulsion). Pour créer cette commande, on compare un signal triangulaire de haute fréquence qu’on nomme la porteuse, avec un signal sinusoïdal de basse fréquence qu’on appelle la modulante. Pour un système triphasé, on a trois modulantes déphasées de la tension de sortie est l’image de modulante. Les signaux de commande ainsi obtenus commandent les interrupteurs  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  respectivement, on applique la commande complémentaire pour les interrupteurs  $K'_1$ ,  $K'_2$  et  $K'_3$ . La figure 2.42 montre le schéma de commande.

Pour le modèle de simulation, la fréquence de la porteuse est de  $1KHz$ . Les signaux

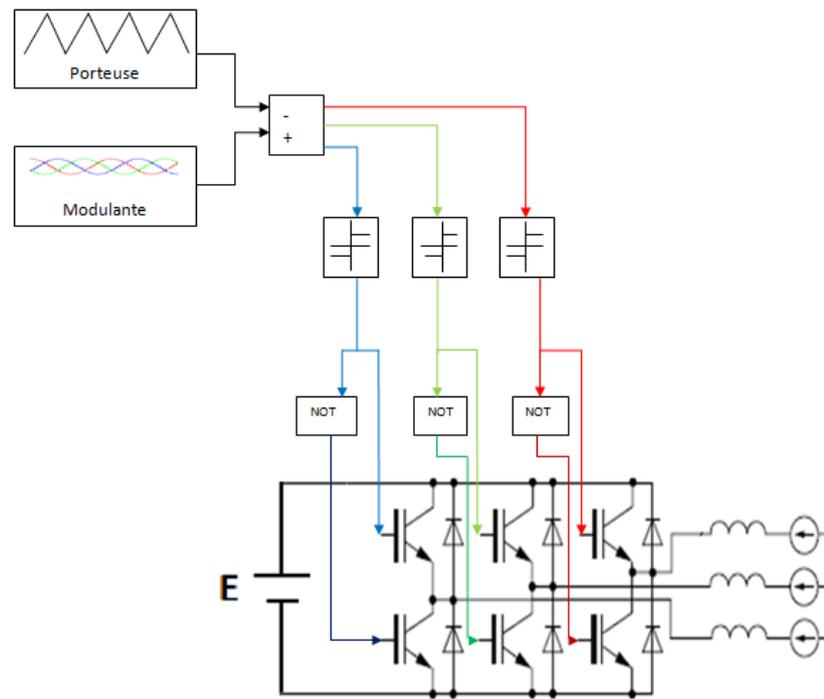


FIGURE 2.42 – Schéma de commande MLI d'un onduleur avec la méthode triangule-sinusoidale

sont de  $50Hz$ . Les signaux ainsi obtenus sont montrés dans la figure 2.43.

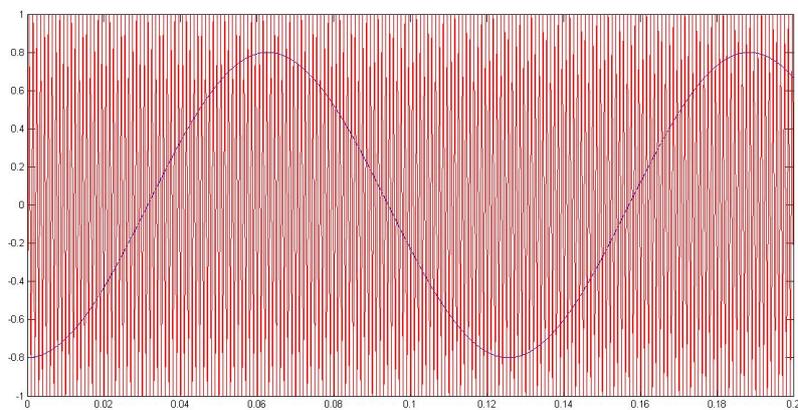


FIGURE 2.43 – Signal de porteuse de la commande MLI

Les tensions obtenues après simulation sont représentées dans la figure 2.44. La figure 2.45 est l'image des courants résultants dans une charge résisto-inductive.

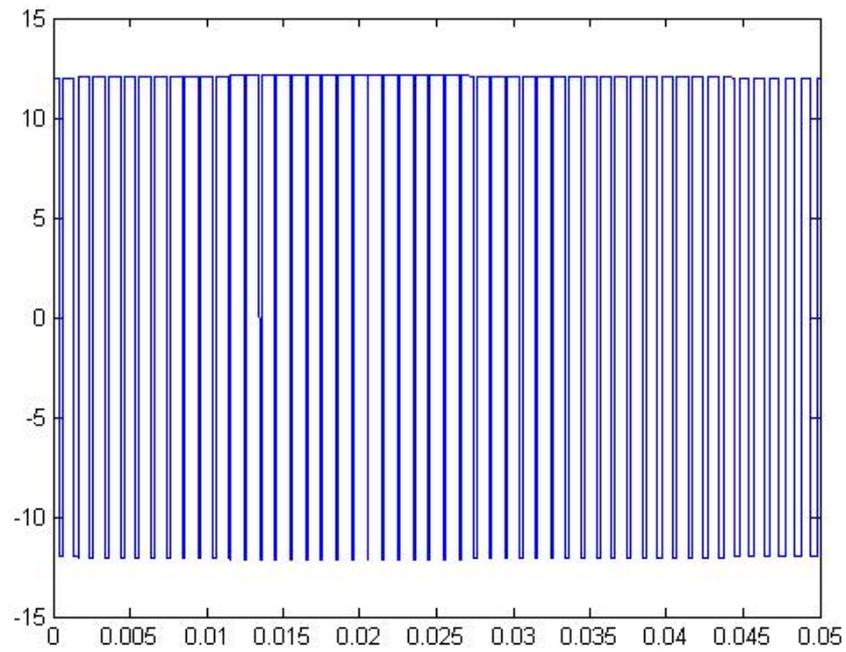


FIGURE 2.44 – Tension à la sortie de l'onduleur MLI

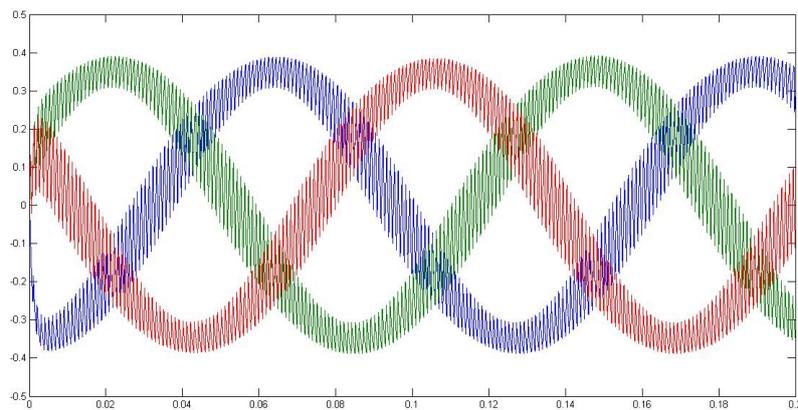


FIGURE 2.45 – Courants d'une charge résisto-inductive à la sortie de l'onduleur MLI

# Chapitre 3

## Modélisation de la génératrice et le redresseur

### 3.1 Modélisation de la génératrice

Suite à l'aperçu que nous avons vu au Chapitre 2 concernant les différents type de génératrices utilisées dans l'éolien. Notre choix c'est porter sur la génératrice synchrone à roue polaire.

#### 3.1.1 Modélisation Mathématique

Avant de commencer cette étape, nous devrions poser des hypothèses simplificatrices afin d'alléger le modèle et réduire le temps de simulation tout en respectant le comportement dynamique de la machine. L'étude est basée sur les hypothèses suivantes [24] :

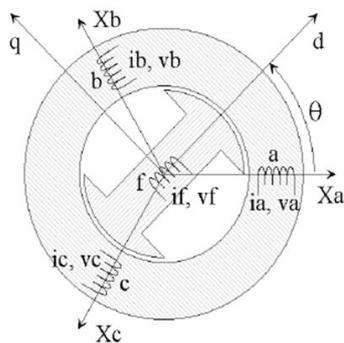


FIGURE 3.1 – Représentation *abc* de la machine synchrone

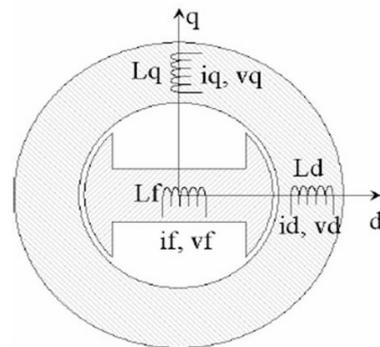


FIGURE 3.2 – Représentation *dq* de la machine synchrone

- Le circuit magnétique n'est pas saturé.
- Les pertes fer sont négligées.
- Les effets des encoches ne sont pas pris en compte.

- Les forces magnétomotrices d'entrefer sont à répartition sinusoïdale dans l'espace.
- Les Résistances et réactances sont considérées indépendantes de la température.
- L'effet de peau est négligé

En tenant compte de ces simplifications, la machine possède trois équations électriques au stator et une équation au rotor. Ces équations possèdent le paramètre  $\Omega$  qui est la vitesse de rotation de l'arbre, ce modèle rend la résolution du système assez difficile en vue de la simulation. Pour simplifier les équations différentielles de la machine, il existe une transformation qui permet de passer du repère triphasé de la machine vers un modèle biphasé qu'on appelle transformée de PARK. Elle est définie ainsi :

$$\begin{pmatrix} X_d \\ X_q \\ X_h \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} P(\theta) \begin{pmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

et la transformée inverse :

$$\begin{pmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} P^{-1}(\theta) \begin{pmatrix} X_d \\ X_q \\ X_h \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Avec :

$$P(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

et

$$P^{-1}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

avec :  $\theta = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta(0)$

Cette transformation nous permet d'écrire les grandeurs statoriques de la génératrice (courant, tension, flux) dans le repère lié au rotor. Le passage d'un modèle à un autre se fait avec l'équation 3.1 et 3.2 .

Le coefficient  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  a été introduit pour conserver la puissance entre les deux référentiels :

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_d i_d + v_q i_q \quad (3.5)$$

### Équations électriques :

Les équation de la machine synchrone à roue polaire sont données comme suit :

$$\begin{cases} v_d = -R_s i_d - \frac{d\phi_d}{dt} + \omega \phi_q \\ v_q = -R_s i_q - \frac{d\phi_q}{dt} - \omega \phi_d \\ v_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \end{cases} \quad (3.6)$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$C_{eol} + C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (3.7)$$

L'équation du couple électromagnétique :

$$C_{em} = p(\phi_d i_q - \phi_q i_d) \quad (3.8)$$

Avec  $p$  : nombre de paires de pôles

### Équations du flux :

équations relient les flux aux courants statoriques et au courant d'excitation :

$$\begin{cases} \phi_d = L_d i_d + M i_f \\ \phi_q = L_q i_q \\ \phi_f = M i_d + L_f i_f \end{cases} \quad (3.9)$$

### Modèle d'état multivariable :

A présent, en remplaçant les équations 3.9 dans 3.6 ,et en prenant comme variable d'état  $x^T = [i_d \ i_q \ i_f]$  et comme variable de commande

$u^T = [v_d \ v_q \ v_f]$  on obtient un système d'état :

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_d \sigma} & \frac{L_q \omega}{L_d \sigma} & \frac{M R_f}{L_d L_q \sigma} \\ -\frac{L_d \omega}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{M \omega}{L_q} \\ \frac{M R_s}{L_d L_f \sigma} & -\frac{M L_q \omega}{L_d L_f \sigma} & -\frac{R_f}{L_f \sigma} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_d \sigma} & 0 & -\frac{M}{L_d L_f \sigma} \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & 0 \\ \frac{M}{L_d L_f \sigma} & 0 & \frac{1}{L_f \sigma} \end{pmatrix} u \quad (3.10)$$

Avec :  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_d L_f}$ , coefficient de dispersion ou de Blondel

### 3.1.2 Simulation de la génératrice :

Après avoir modélisé notre génératrice, nous allons maintenant procéder à la simulation en boucle ouverte. Les valeurs des paramètres de la machine sont illustrés dans le tableau suivant :

Les paramètres	Valeur
$R_s$	4.8 ohm
$R_f$	160 ohm
$L_d$	0.16 H
$L_q$	0.16 H
$L_f$	13 H
$M$	1.4 H

TABLE 3.1 – paramètre de la machine synchrone

Les résultats de simulation, à vide et en charge donnent les résultats suivant :

- Pour la simulation a vide, les courant sont nuls, seul  $i_f$  sera non nul. pour les tensions :

$$\begin{cases} v_d = 0 \\ v_q = -\omega i_d L_d \\ v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \end{cases} \quad (3.11)$$

- pour les simulation en charge, on a utilisé une résistance  $R_{ch} = 100\Omega$  et  $L_{ch} = 60mH$ . Les résultats peuvent être interpréter comme suit :
- pour les figures 3.3,on remarque que la puissance et la courbe caractéristique de la machine ont atteint le régime permanent en  $t = 0.4s$ , ceci et dû à la faible inertie de la machine. On remarque aussi que le Couple électromagnétique est négatif, ce qui est normal pour une génératrice. Le courant dans la phase (a) respectivement dans les autres phases (il s’agit d’un système triphasé équilibré) est légèrement déphasé par rapport à la tension dans la même phase. Ceci car l’inductance de charge  $L_{ch}$  est petite devant la résistance de charge  $R_{ch}$
- Dans la figure 3.4, on a introduit un couple mécanique :  $C_{eol} = 7N.m$  au démarrage puis à l’instant  $t = 2s$  on lui ajoute  $2N.m$  pour devenir  $C_{eol} = 9N.m$ .
- On constate qu’en dehors de la zone du démarrage, le régime permanent est parfaitement établie au bout de  $t = 0.7s$ , le courant d’excitation est toujours établi à  $I_f = 1A$ , la vitesse de rotation de la génératrice est autour de  $w = 900tr/min$ .
- Après l’échelon de couple appliqué à la génératrice, on remarque que le courant  $I_f$  subit une légère perturbation et se stabilise à  $1A$ , la puissance et la vitesse de rotation ont augmenté et le couple électromagnétique a diminué.

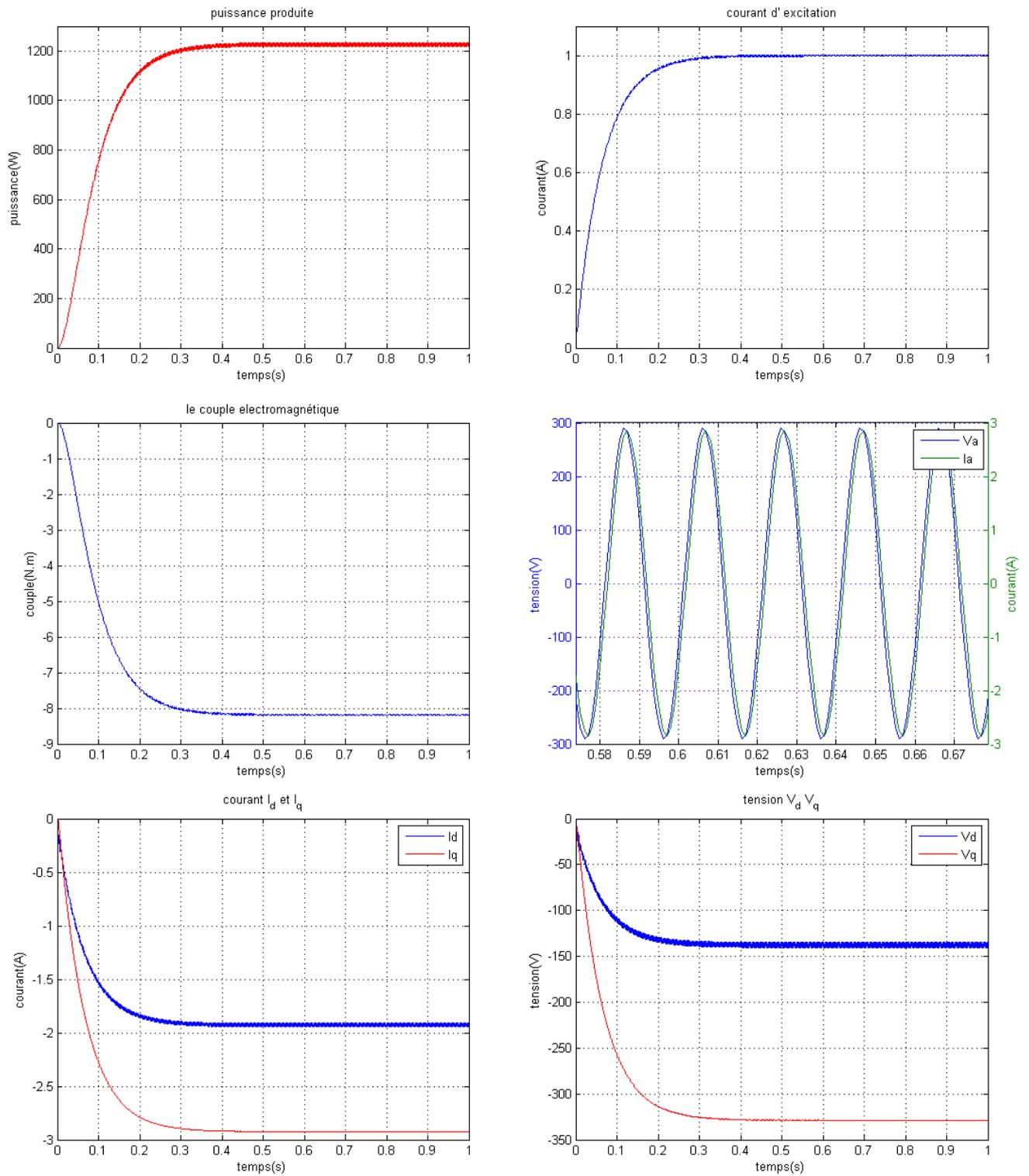


FIGURE 3.3 – Résultats de simulation avec  $V_f=160V$  et  $\omega=1500tr/min$

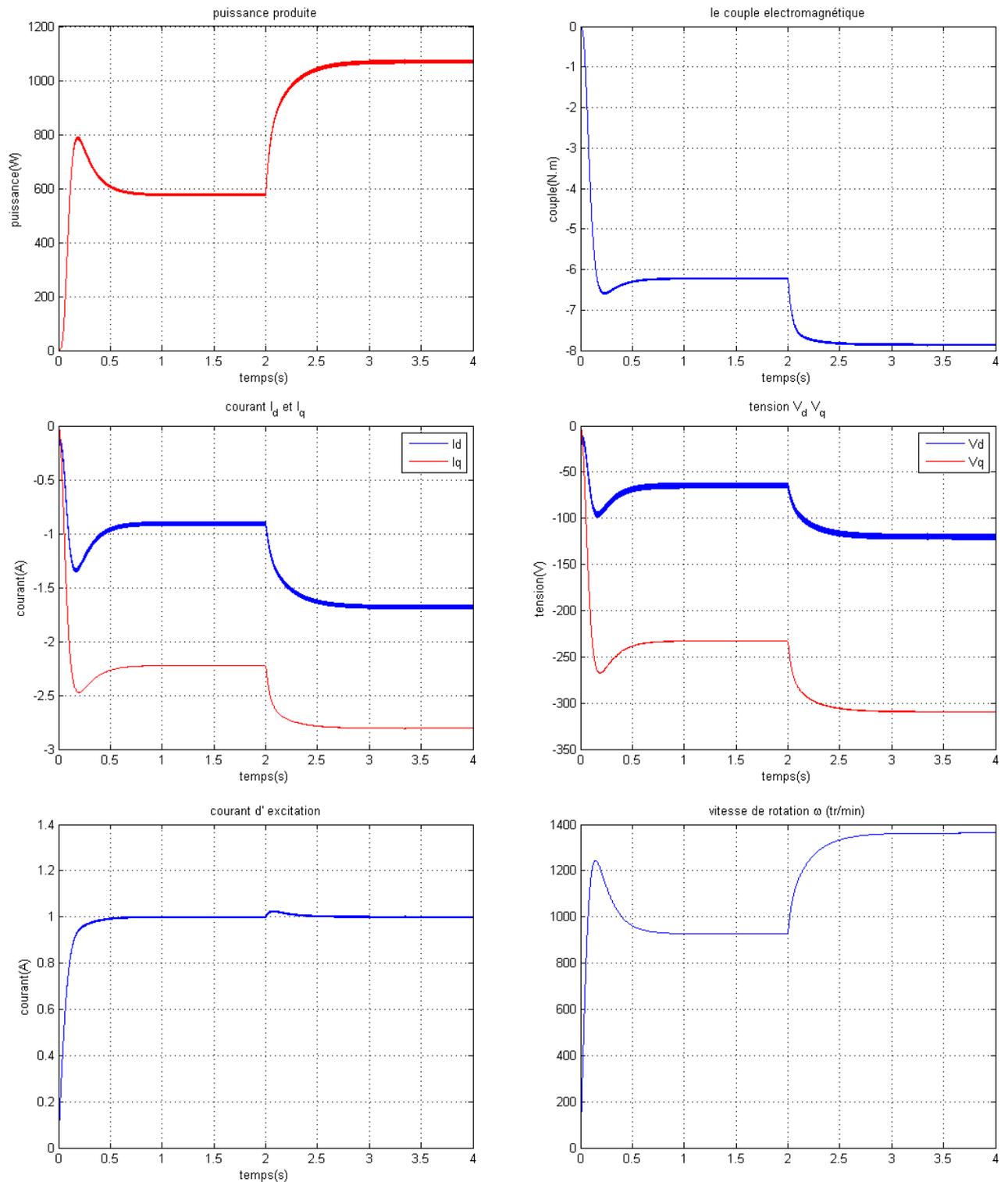


FIGURE 3.4 – Résultats de simulation avec  $V_f=160V$  et  $C_{eol}$  variable

## 3.2 Modélisation du redresseur

Après avoir Modélisé la partie Mécanique de notre éolienne double-rotor et La génératrice synchrone à roue polaire, nous allons à présent nous intéresser à la conversion de cette énergie sous forme de tension alternative triphasée en tension continue qui alimentera une batterie de stockage ou bien un bus-continu pour une éventuelle reconversion en alternatif (220V/50Hz).

Dans le cas de notre étude, on s'intéressera au double étage de conversion (Pont de diodes triphasé + hacheur abaisseur-survolteur). Cette configuration a déjà été expliquée dans le chapitre précédent.

### 3.2.1 Modélisation du pont de diodes triphasé

Dans notre étude, on ne prendra pas en compte l'empiètement anodique on considère les diodes comme des interrupteurs parfaits. La figure 3.5ci-dessous nous montre le pont de diode utilisé.

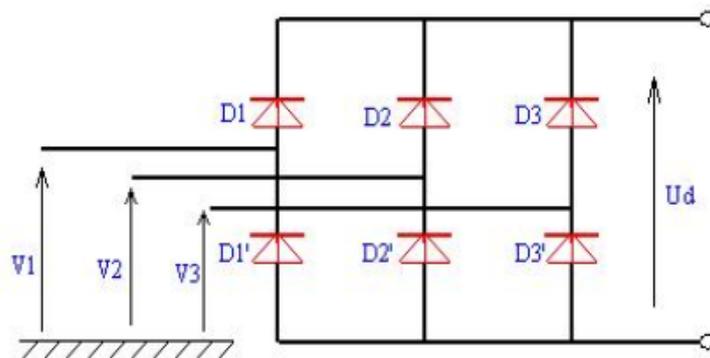


FIGURE 3.5 – Redresseur à diode.

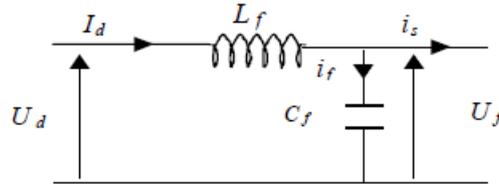
Les conditions de conduction des diodes sont comme suit :

- $D_i$  conduit si  $V_i \geq \max(V_1, V_2, V_3)$
- $D'_i$  conduit si  $V_i \leq \min(V_1, V_2, V_3)$

Pour voir l'allure des tensions et de la tension redressée, voir la figure (chapitre précédent section 3)

On remarque que la fréquence de la tension redressée est égale à six fois la fréquence de la source ( $f_{dc} = 6 \times 50Hz = 300Hz$ ). Cette tension continue qui alimentera ensuite notre hacheur Buck-Boost causera des désagréments pour l'atteinte de notre objectif qui est de fixer la tension de sortie du convertisseur DC/DC. Pour remédier à cela, un filtre passe-bas est nécessaire afin de lisser la tension en aval du pont de diode. La figure ci-dessous schématise le filtre utilisé.

Pour dimensionner les composants passifs constituant ce filtre ( $L_f, C_f$ ), on doit tout d'abord le modéliser.


 FIGURE 3.6 – Filtre  $LC$ 

On a :

$$\begin{cases} U_d = L_f \frac{dI_d}{dt} + U_f \\ \frac{dU_f}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_d - i_s) \end{cases} \quad (3.12)$$

On remplace l'expression de  $U_f$  dans la première, on trouve :

$$U_d = U_f + L_f C_f \frac{d^2 U_f}{dt^2} + L_f \frac{di_d}{dt}$$

on en déduit que :

$$\frac{U_f}{U_d} = \frac{1}{1 + L_f C_f s^2} \quad (3.13)$$

La pulsation de coupure du filtre est :  $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{C_f L_f}}$  et on en déduit la fréquence de coupure

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_f L_f}} \quad (3.14)$$

La fréquence de la source (génératrice synchrone) est variable et est due au fonctionnement de notre génératrice qui doit suivre l'allure du vent afin de fournir le maximum de puissance. C'est pour cela qu'il faut dimensionner notre filtre pour la fréquence minimum que peut fournir la génératrice. Si on prend un vent de démarrage pour le système de  $3m/s$ , avec un coefficient de vitesse réduite optimal de 8, ajoutant à cela un rapport de transformation mécanique  $G = 2$  et un nombre de pair de pôle  $p = 2$ , on aura un pulsation  $\omega_{min} = 96rad.sec^{-1}$ . Si on prend ce cas de figure et en choisissant un des composants on aura :  $L_f = 230mH$ ;  $C_f = 470\mu f$

### 3.2.2 Modélisation du hacheur Buck-Boost

La figure du hacheur abaisseur-élevateur a été représentée lors du chapitre précédent.

#### Mise en équation

En considérant un hacheur Buck-Boost avec  $V_e$  comme tension d'entrée,  $V_s$  comme tension de sortie,  $V_L$  la tension aux bornes de l'inductance  $L$ ,  $I_c$  le courant qui passe par la capacité  $C$ ,  $i$  le courant qui passe par  $L$  et  $I$  le courant qui passe par la charge R.

si on prend une période de découpage  $T_d$  :

$0 \leq t \leq \alpha T_d$  :

Si l'interrupteur est activé (fermé), on aura :

$$V_L = V_e$$

$\alpha T_d \leq t \leq T_d$  :

Si l'interrupteur est ouvert, on aura :

$$V_L = -V_s$$

$$V_s = L \frac{di}{dt}$$

l'équation des courants :  $i = I + I_c = C \frac{dV_s}{dt} + \frac{V_s}{R}$

En appliquant la transformée de Laplace on aura :

$$V_s(s) = \frac{1}{Cs + \frac{1}{R}} i(s) \quad (3.15)$$

En régime permanent,  $V_L = 0$ , ainsi on trouvera aisément le gain du convertisseur qui est :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3.16)$$

Le paramètre alpha est généré en comparant une modulante avec une porteuse en dents de scie de fréquence  $f_{req} = 3KHz$ .

La figure 3.7 nous montre la tension de sortie  $V_s$  avec comme tension d'entrée  $V_e = 100V$  en appliquant différent rapport cyclique.

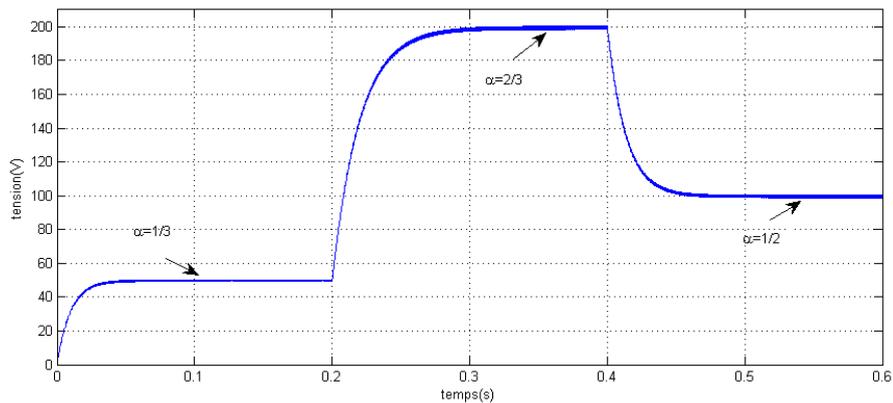


FIGURE 3.7 – Tension de sortie du hacheur

### 3.2.3 Modélisation du hacheur abaisseur

Pour Contrôler le flux d'excitation de la génératrice synchrone à roue polaire, ainsi optimiser son utilisation vis-à-vis des fluctuations du vent, un dispositif de réglage de la tension (et donc du courant) est nécessaire. Pour cela on utilisera dans notre étude un hacheur Buck qui est représenté dans la figure 3.8 :

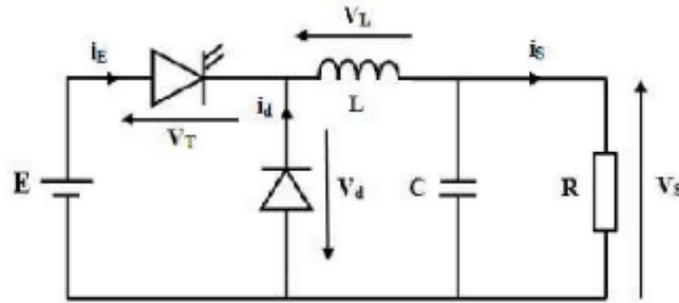


FIGURE 3.8 – Hacheur Buck pour l'alimentation du Rotor

Avec  $E$  la tension d'entrée qui est fixe,  $V_s$  la tension de sortie,  $V_L$  la tension aux bornes de l'inductance,  $i_L$  le courant qui passe à travers cette inductance,  $I_c$  le courant à travers le condensateur  $C$  et  $i_s$  le courant qui passe par la charge.

#### Mise en équation

si on prend une période de découpage  $T_d$  :

$$0 \leq t \leq \alpha T_d :$$

Si l'interrupteur est activé (fermé), on aura :

$$V_L = E - V_s$$

$$\alpha T_d \leq t \leq T_d :$$

Si l'interrupteur est ouvert, on aura :

$$V_L = V_s$$

$$V_s = L \frac{di}{dt}$$

On aura la même fonction de transfert entre la tension de sortie et le courant dans l'inductance que le convertisseur précédent (voir l'équation 3.15)

En régime permanent,  $V_L = 0$ . Ainsi on trouvera aisément le gain du convertisseur qui est :

$$\frac{V_s}{V_e} = \alpha \tag{3.17}$$

La figure 3.9 montre la tension de sortie  $V_s$  avec comme tension d'entrée  $V_e = 100V$  en appliquant différents rapports cycliques.

On voit bien dans la figure 3.9 que la tension de sortie suit bien la tension désirée avec un réponse très rapide.

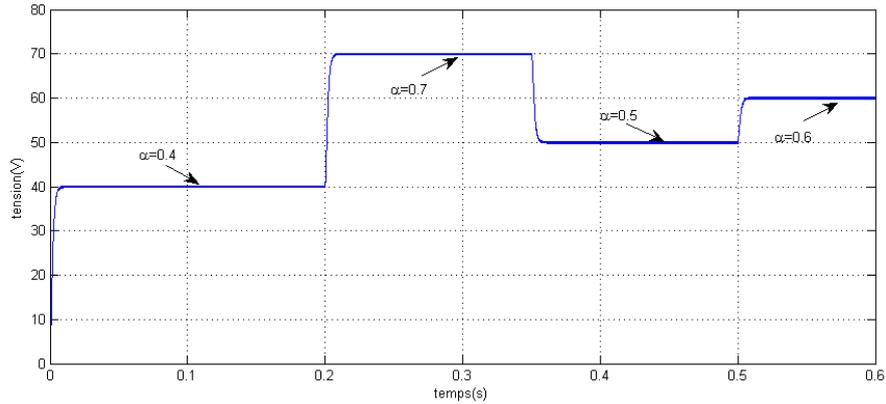


FIGURE 3.9 – Tension de sortie du hacheur abaisseur

Dans notre cas, la charge est une résistance  $R_f$  en série avec une inductance  $L_f$ , qui représente le rotor de notre génératrice synchrone à roue polaire.

Les démarches de démonstration précédentes restent valables pour ce cas si, seule la fonction de transfert entre  $V_s$  et  $i_L$  change. Mais elle sera fonction de la tension  $V_L$  et non du courant  $i_L$ . Elle s'écrira :

$$V_s(s) = \frac{1}{L} \frac{1}{Cs^2 + \frac{1}{R}s + \frac{1}{L_f}} V_L(s) \quad (3.18)$$

Le paramètre alpha est généré en comparant une modulante avec une porteuse en dents de scie de fréquence  $f_{req} = 3KHz$ .

La figure 3.10 montre la tension de sortie  $V_s$  avec comme tension d'entrée  $V_e = 100V$  en appliquant différents rapports cycliques.

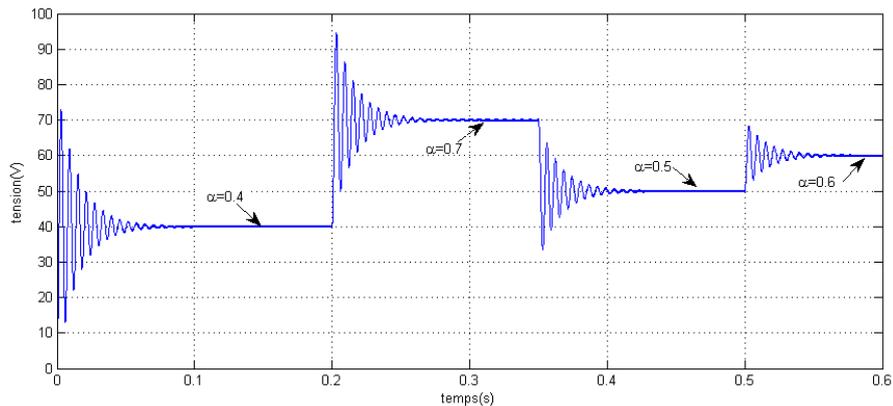


FIGURE 3.10 – Tension de sortie du hacheur abaisseur avec charge inducto-résistive

Comme on peut le voir sur la figure 3.10, la tension de sortie est une réponse oscillatoire en exponentielle décroissante, ceci s'explique par la nature inducto-résistive de notre charge. La réponse plus ou moins longue ou rapide du convertisseur peuvent être ajuster en modifiant Les valeurs de l'inductance et de la capacité du Convertisseur.

# Chapitre 4

## Maximisation de l'énergie collectée

Après avoir modélisé les composants essentiels de la chaîne de conversion éolienne, on va aborder lors de ce chapitre la commande de la génératrice synchrone à roue polaire.

Pour ce faire, nous allons considérer la partie électronique de puissance comme une charge variable pour la génératrice et optimiser le fonctionnement de la génératrice en agissant sur l'excitation du rotor et ainsi extraire le maximum de puissance du vent.

### 4.1 Commande du courant d'excitation

Avant d'optimiser le fonctionnement complet de la génératrice, on doit d'abord réguler le courant d'excitation dans la machine pour qu'il soit insensible aux variations du couple et les perturbations externe pour le circuit d'excitation.

#### 4.1.1 Découplage du courant inducteur

L'axe d, étant par convention colinéaire avec le rotor, il y a un couplage direct sur cet axe entre le stator et le rotor dont il faut s'affranchir.

A partir des équations de tension et de flux au rotor, l'équation différentielle du courant d'excitation devient :

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{1}{L_f}(V_f - R_f I_f) - \frac{M}{L_f} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_f} V_f - \frac{R_f}{L_f} I_f - \frac{M}{L_f} \frac{dI_d}{dt} \quad (4.1)$$

Ce qui conduit par la transformée de Laplace de  $I_f$  à :

$$I_f(s) = \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \frac{L_f}{R_f} s} V_f(s) - \frac{\frac{M}{R_f} s}{1 + \frac{L_f}{R_f} s} I_d(s) \quad (4.2)$$

Le courant de l'inducteur  $I_f$  est lié à la tension d'excitation et au courant  $I_d$  qui peut être ici considéré comme une perturbation mesurable. Il nous est donc possible de compenser son effet par une contre réaction adéquate, ainsi nous pouvons l'exprimer  $I_f$

de la façon suivante :

$$I_f(s) = \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \frac{L_f}{R_f}s} (V_f'(s) + MsI_d(s)) - \frac{\frac{M}{R_f}s}{1 + \frac{L_f}{R_f}s} I_d(s) = \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \frac{L_f}{R_f}s} V_f'(s) \quad (4.3)$$

Nous aboutissons ainsi à un transfert mono-variable du premier ordre :

$$\frac{I_f(s)}{V_f'(s)} = \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \frac{L_f}{R_f}s} \quad (4.4)$$

Le schéma de la figure 4.1 nous montre la configuration en blocs du découplage :

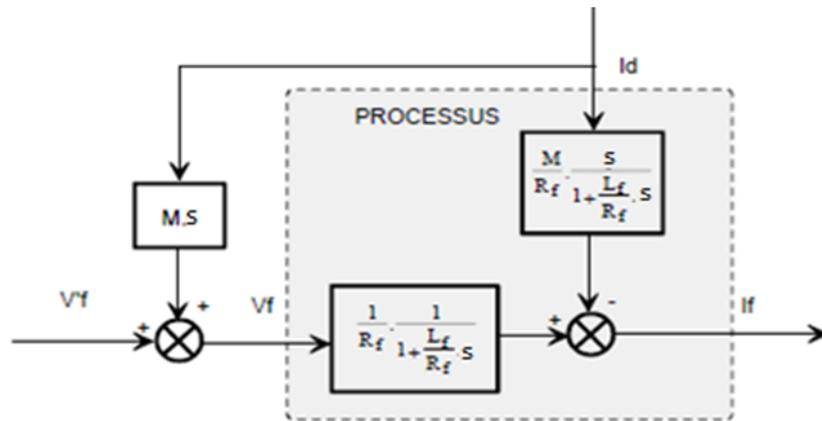


FIGURE 4.1 – Schéma équivalent après découplage.

On remarque que le modèle découplé contient une dérivation du courant  $I_d$  qui est considérée comme une perturbation mesurable, on pourra approximer la transmittance de la perturbation par la fonction de transfert :

$$\frac{Ms}{1 + \tau_1 p} \text{ tel que } (\tau_1 \ll M).$$

Il suffit maintenant de déterminer les paramètres du régulateur PI, le choix de ce régulateur se justifie par sa simplicité et sa capacité à annuler l'erreur statique.

La figure 4.2 nous montre le schéma global de la régulation du courant d'excitation.

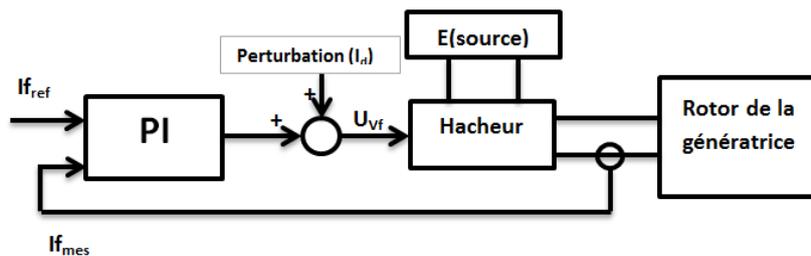


FIGURE 4.2 – Schéma de régulation du courant d'excitation

Le courant désiré est comparé avec sa mesure, l'erreur ( $I_{fref} - I_{fmes}$ ) est régulée par le PI, ensuite on ajoute l'effet de la perturbation pour avoir la commande du hacheur abaisseur. Enfin on applique la tension  $V_f$  aux bornes du rotor et on mesure le courant l'excitation pour un contrôle en boucle fermée.

### 4.1.2 Simulation

En appliquant le  $C_{eol}$  suivant à la génératrice (voir figure 4.4, on remarque que le courant  $I_f$  est bien régulé et reste insensible aux perturbations du couple. Lors de l'application de la rampe, le courant  $I_f$  tourne autour de 1A avec des variations de l'ordre de 1% ce qui est parfaitement acceptable. Pour ce qui est de l'application des deux échelons (négatif à l'instant 3s et positif à l'instant 4s), la variation du courant reste dans le même ordre et le courant se stabilise toujours à la valeur désirée.

En conclusion, la structure proposée et les paramètres utilisés pour la régulation ont donné de bons résultats et permettent ainsi de valider le modèle pour la suite de la commande.

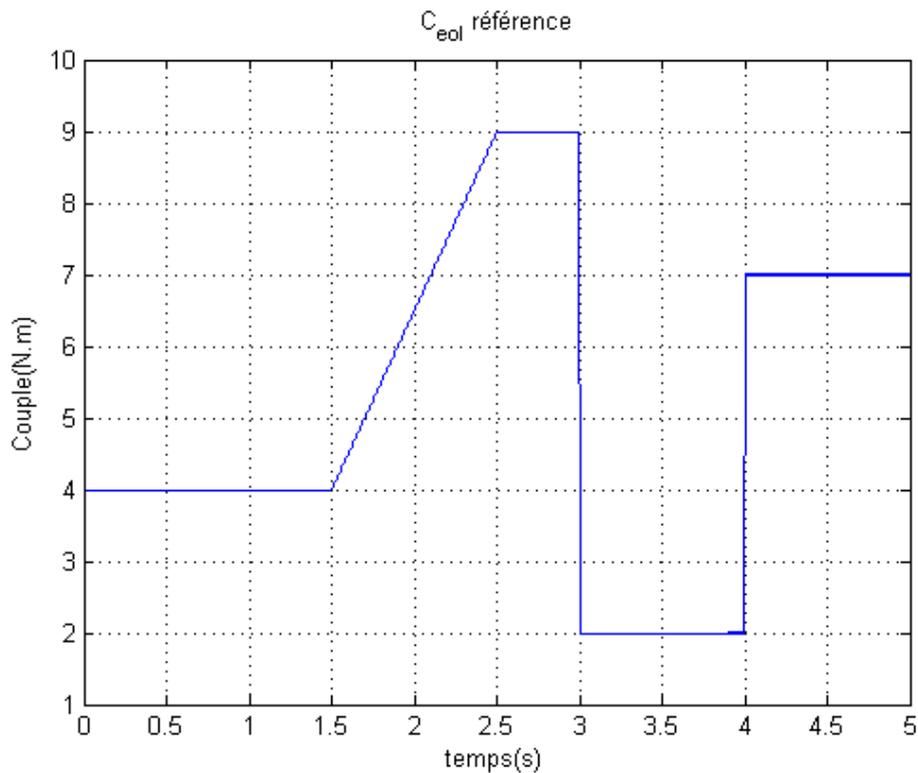
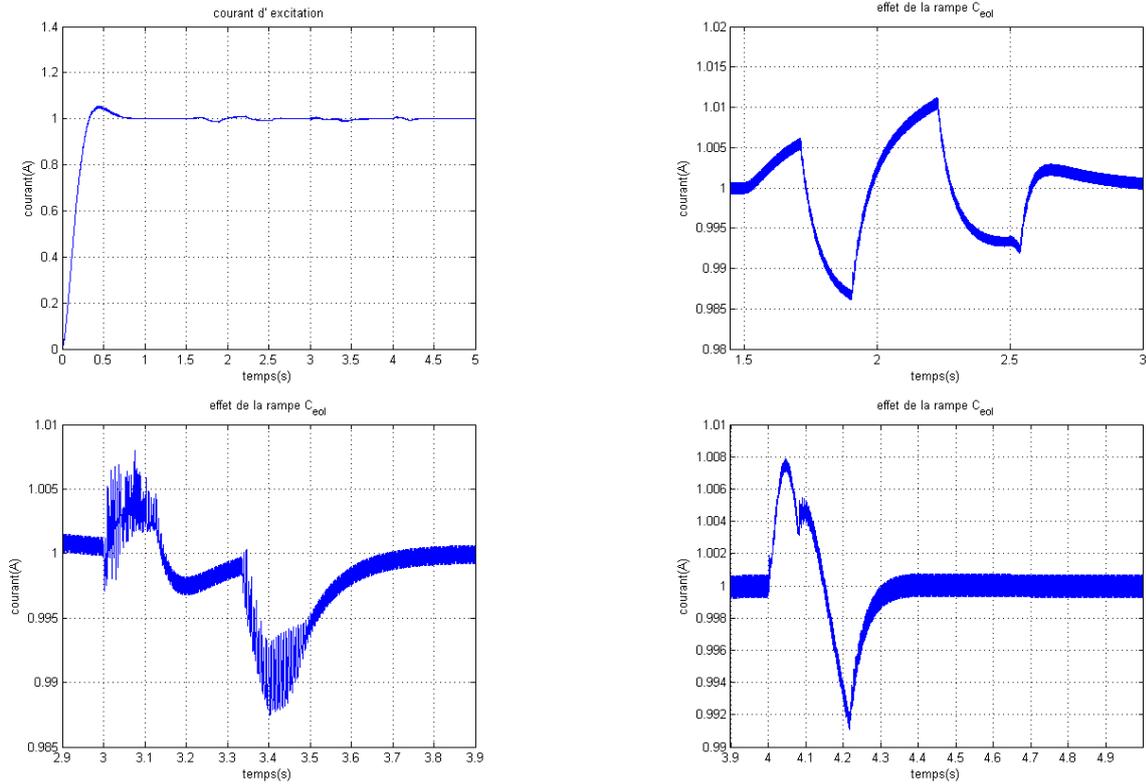


FIGURE 4.3 – Couple appliqué


 FIGURE 4.4 – Résultats de simulation pour le courant d'excitation  $I_f$ 

## 4.2 Commande de la vitesse angulaire

### 4.2.1 Regulation

Après avoir contrôlé le courant d'excitation  $I_f$ , nous allons maintenant nous intéresser à la commande de la vitesse de la génératrice par l'excitation du rotor.

La vitesse de rotation de l'arbre et le couple électromagnétique sont liés par la relation :

$$C_{eol} + C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega$$

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est négatif en mode génératrice.

On en déduit que :

$$\Omega(p) = \frac{1}{Jp + f} C_{eol}(s) + \frac{1}{Jp + f} C_{em}(s) \quad (4.5)$$

Le  $C_{eol}$  est considéré comme une perturbation négligeable puisque le rôle de régulation est d'adapter la consigne du couple électromagnétique aux variations du couple éolien. Le couple électromagnétique est défini par la relation :

$$\begin{aligned} C_{em} &= p(\phi_d i_q - \phi_q i_d) \\ &= p(L_d i_d i_q + M i_f i_q - L_q i_q i_d) \end{aligned} \quad (4.6)$$

La génératrice utilisée est à pôle lisse ( $L_d = L_q$ ).

Donc :

$$C_{em} = pMi_q i_f \quad (4.7)$$

comme dit précédemment,  $C_{em}$  est négatif dans notre configuration, ce qui permet de réécrire l'équation 4.7 :

$$i_f = GC_{em} \quad (4.8)$$

avec :  $G = -\frac{1}{pMi_q}$

Il y a une relation de proportionnalité entre le couple électromagnétique et le courant d'excitation ce qui permet d'utiliser indirectement  $C_{em_{ref}}$  comme consigne pour la boucle de régulation du courant.

La figure 4.5 illustre la boucle de régulation de vitesse. En utilisera comme consigne pour nos simulation la vitesse de synchronisme de la machine ( $\Omega = 1500tr/min$ ).

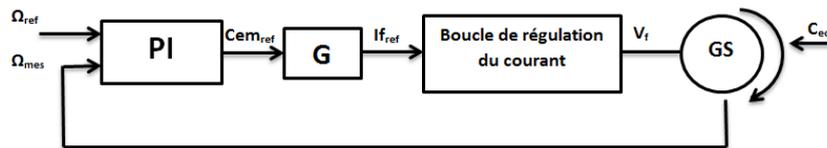


FIGURE 4.5 – boucle d'asservissement de vitesse

Nous allons appliquer un couple variable à la génératrice pour attester de la validité du modèle de régulation. La figure ci-dessous montre le couple éolien imposé. A part la partie transitoire, on voit bien que la vitesse de rotation suit bien la référence, pendant la phase de montée du  $C_{eol}$ , la vitesse varie entre (1560 et 1450 tr/min) ce qui représente (+/-) 4% de  $\Omega_{ref}$ . A l'instant  $t = 4.5s$  l'échelon négatif déstabilise grandement la vitesse de rotation mais reprend très rapidement sa vitesse de référence.

## 4.2.2 Asservissement de vitesse

Nous allons maintenant asservir la vitesse en lui donnant des consignes variables, pour qu'il puisse par la suite suivre la vitesse optimale et garantir un rendement maximal pour l'éolienne.

## 4.2.3 Simulation

La poursuite de la consigne de vitesse pour le profil choisi a bien été respectée, on voit bien qu'après le régime transitoire, la génératrice suit la consigne de référence avec de léger dépassement pour la poursuite de la rampe, et un grand dépassement lors de l'application de l'échelon négatif de vitesse, mais revient rapidement aux alentours de  $1000tr/min$  (+/-) 2%, ce qui est acceptable et permet de valider le régulateur.

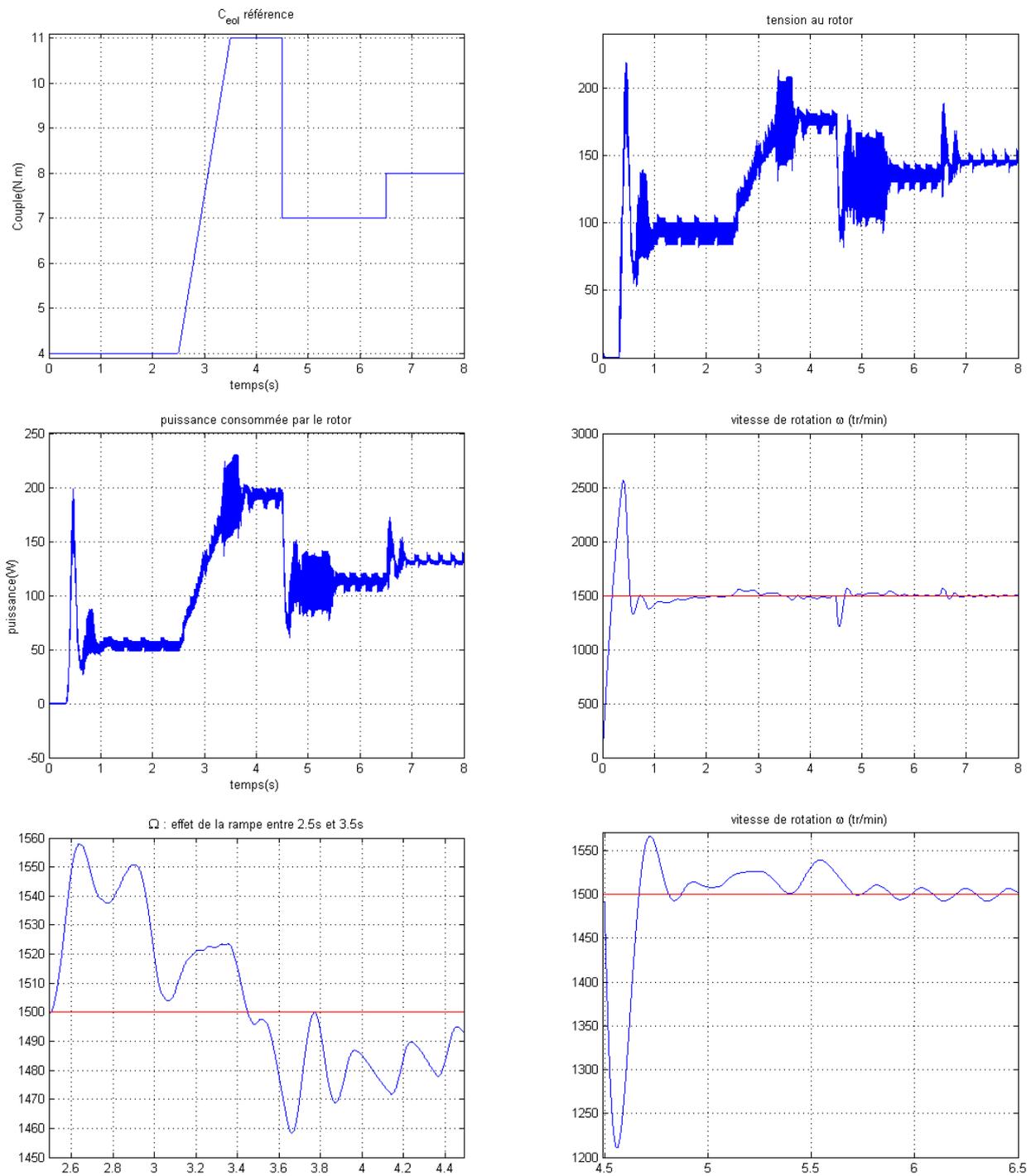


FIGURE 4.6 – Résultats de simulation avec variation du  $C_{eol}$

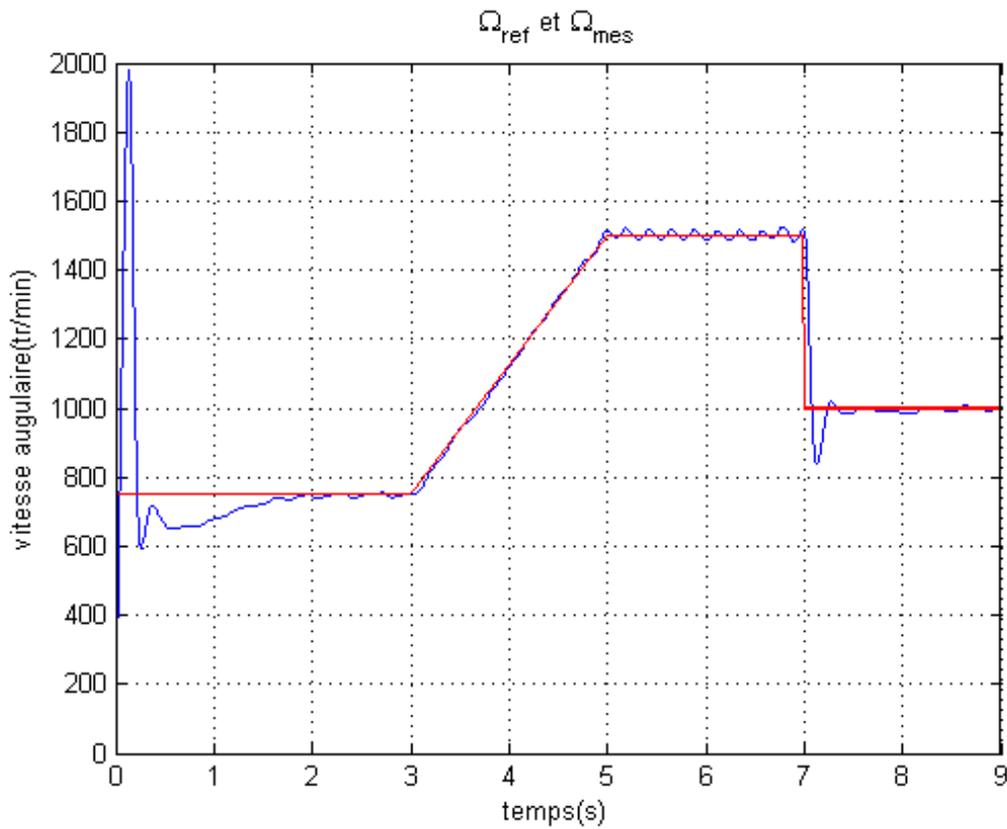


FIGURE 4.7 – consigne de vitesse

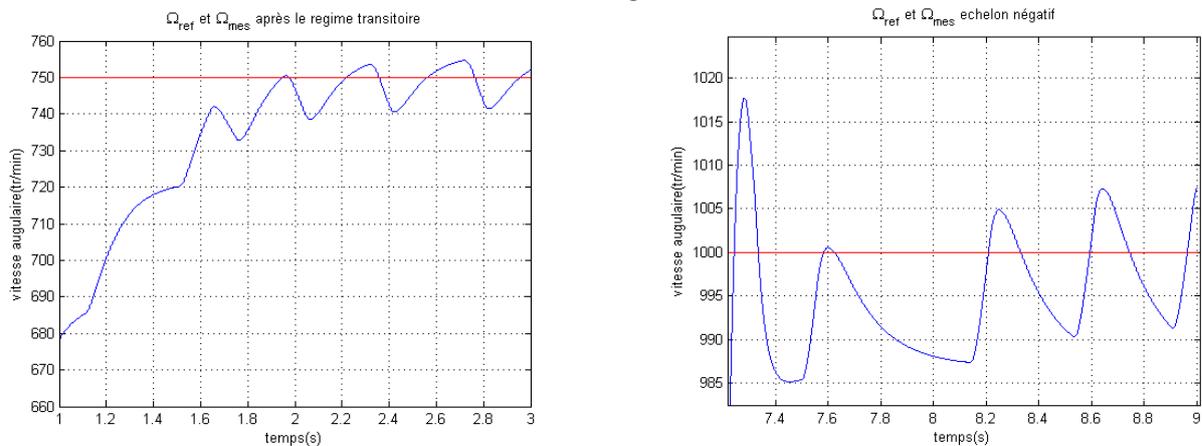


FIGURE 4.8 – zoom sur la consigne de vitesse

## 4.3 Commande par puissance optimale

### 4.3.1 Principe

Pour pouvoir extraire le maximum de puissance de la turbine éolienne, on doit maintenir le coefficient de puissance de l'éolienne à son maximum, il dépend exclusivement du rapport de vitesse ( $\lambda$ ), la vitesse du vent n'étant pas contrôlable, il ne reste plus qu'à commander la vitesse angulaire de l'éolienne.

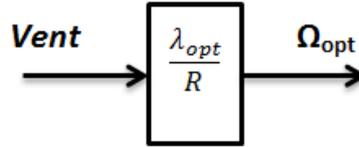
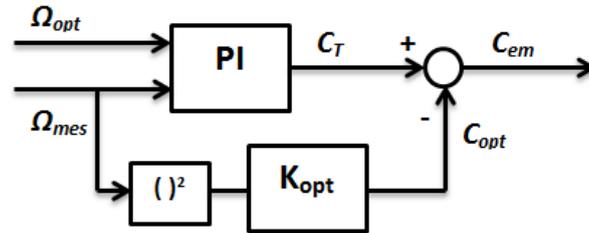


FIGURE 4.9 – Vitesse optimale

Dans la section précédente, on a effectué l'asservissement de vitesse à partir de l'excitation  $I_f$ , on va utiliser la même configuration en ajoutant le vitesse du vent comme consigne (voir la figure 4.9).


 FIGURE 4.10 – Commande pour la poursuite de  $\Omega_{opt}$ 

La puissance optimale extractible du vent :

$$\begin{aligned} P_{opt} &= \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{p_{opt}} v^3 \\ &= \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{p_{opt}} \left( \frac{\Omega_{opt}}{\lambda_{opt}} \right)^3 \end{aligned} \quad (4.9)$$

On a :  $C_{opt} = \frac{P_{opt}}{\Omega_{opt}}$

On peut écrire

$$C_{opt} = K_{opt} \Omega_{opt}^2 \quad (4.10)$$

avec :  $K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \left( \frac{C_{p_{opt}}}{\lambda_{opt}} \right)^3$

Cette relation est utilisée dans le schéma de régulation si dessus, le couple total  $C_{T_{réf}}$  que fourni le régulateur proportionnel intégrale est comparé avec le  $C_{opt}$  que peut fournir les rotors. Le couple total est donné par :

$$C_T = C_{opt} + C_{em} \cdot \longrightarrow C_{em} = C_T - C_{opt}$$

Le  $C_{em_{réf}}$  obtenu sera injecté dans la boucle de régulation du courant d'excitation  $I_f$ .

Pour valider le modèle, on va appliquer deux configurations du vent, une configuration avec des consignes en rampe et en échelon, et une autre avec un vent qui se rapproche de la réalité.

### 4.3.2 Simulation

On applique le modèle du vent de la figure 4.14. La puissance électrique est représentée dans la figure 4.13.

Les principaux résultats (4.14 :en appliquant le vent comme l'illustre la première figure, on voit bien que le coefficient de puissance est supérieur à 0.54 sur toute la plage de variation du vent. En dehors du régime transitoire et des grandes perturbations, le  $C_p$  est supérieur a 0.6.

La puissance de sortie est assez variable et dépend fortement des fluctuations du couple.La vitesse de la génératrice varie entre  $800tr/min$  et  $1700tr/min$ . La puissance consommée par le rotor atteint environ  $100W$  pour un vent maximal de  $10m/s$ .

Pour le deuxième profile du vent (figure 4.11), on remarque que la puissance extraite suit bien la puissance optimale en connaissance du vent. La caractéristique de puissance tourne autour de 0.6. En dehors du régime transitoire, la puissance consommée par le rotor est inférieure à  $100W$

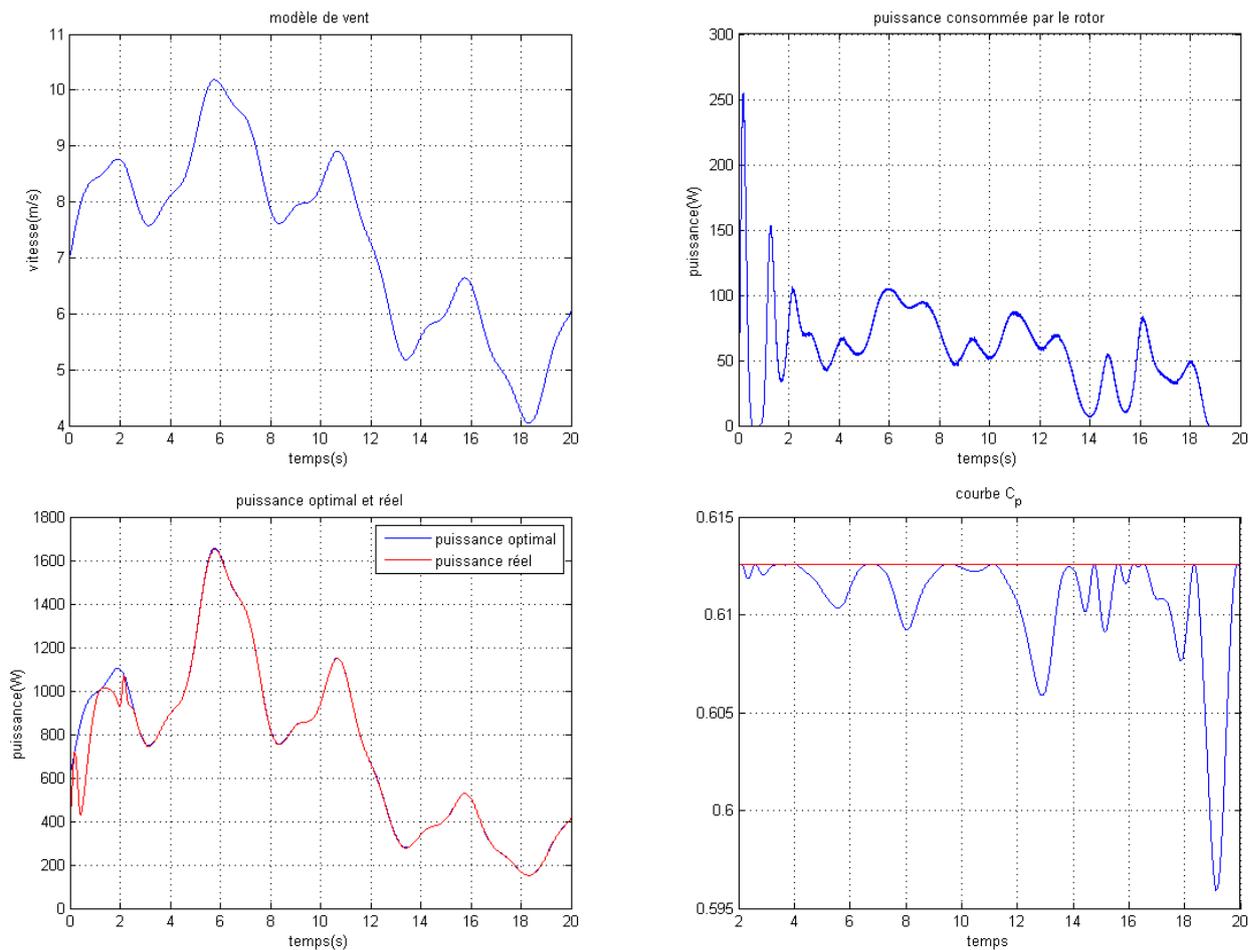


FIGURE 4.11 – Résultats de simulation pour le un vent perturbé

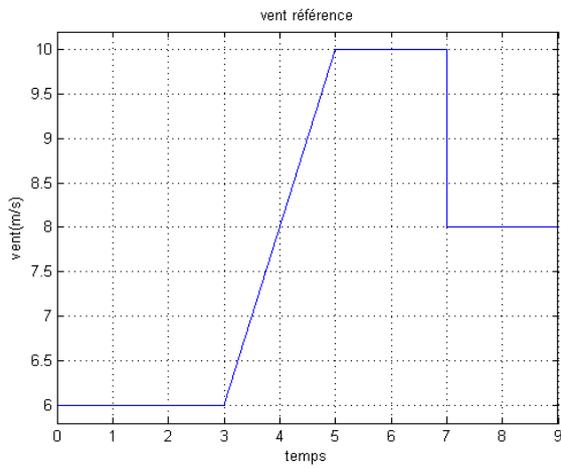


FIGURE 4.12 – vent appliqué

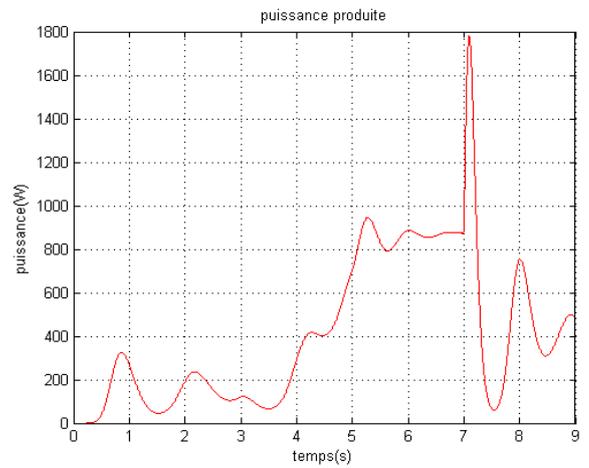


FIGURE 4.13 – puissance de sortie

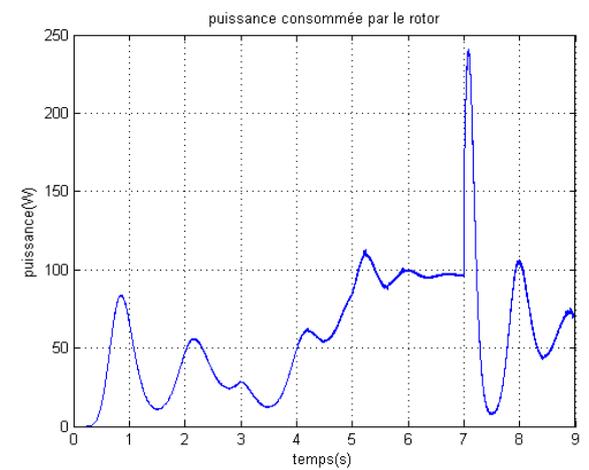
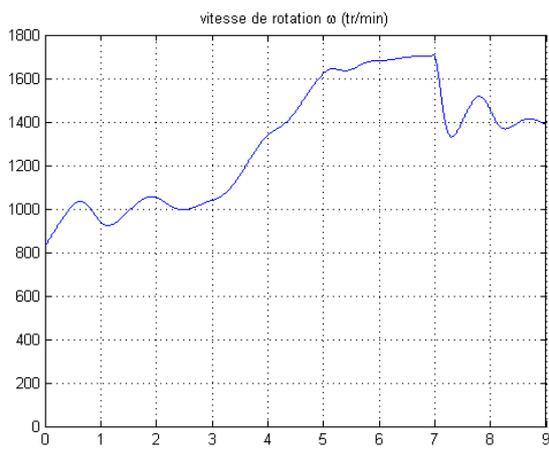
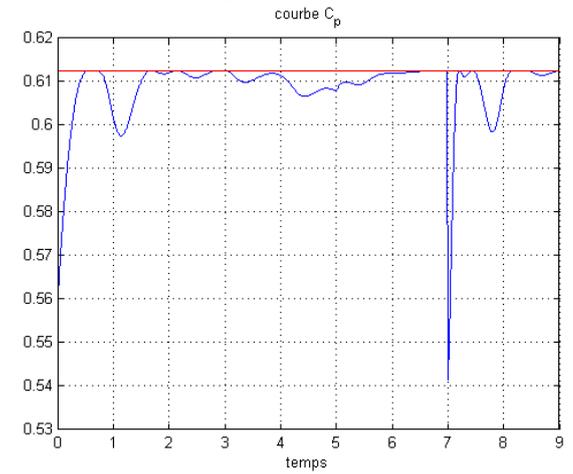
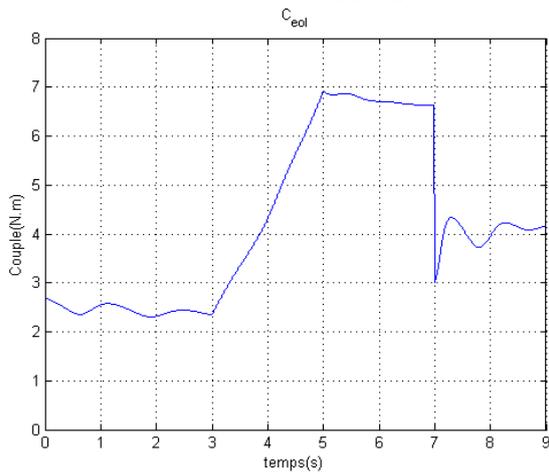


FIGURE 4.14 – Résultats de simulation pour le 1<sup>er</sup> vent

## 4.4 Commande à base de MPPT

### 4.4.1 Caractéristique puissance-vitesse de rotation de l'arbre et la tension d'excitation $V_f$ du système éolienne-génératrice

La figure 4.15 montre la caractéristique de notre système et la relation entre les différents paramètres.

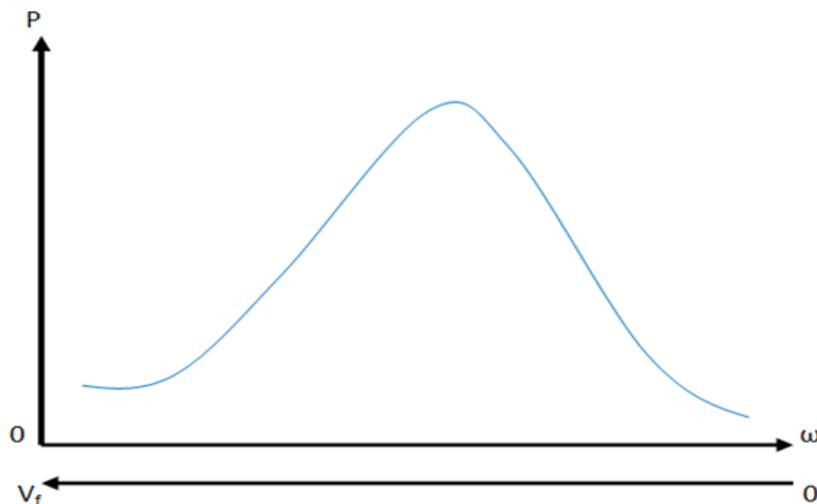


FIGURE 4.15 – Caractéristique puissance-vitesse de rotation de l'arbre et la tension d'excitation  $V_f$  du système éolienne-génératrice

On remarque que la vitesse de rotation de l'arbre est inversement proportionnelle à la tension d'excitation  $V_f$ . Cela peut être expliqué pour le fait que le couple électromagnétique développé au rotor est lié indirectement à la tension d'excitation. Cette relation réside dans le fait que lors d'un ajout d'efforts à la génératrice la vitesse de l'arbre diminue. Or le couple électromagnétique est un couple résistant, donc plus on augmente  $V_f$  plus la contrainte sur l'arbre est importante, par conséquent la vitesse  $\Omega$  diminue.

Pour la synthèse de la commande qui suit, on régule la puissance développée par action sur la tension  $V_f$ .

### 4.4.2 La commande MPPT

La commande MPPT (en anglais : Maximum Power Point Tracking) est une stratégie d'optimisation. Elle consiste à la recherche du point de fonctionnement maximal du système, et le faire fonctionner dans le voisinage de ce point. Cette technique permet l'extraction maximale d'énergie et de maximiser le rendement du système. Plusieurs types de commandes MPPT sont proposés, on s'est intéressé dans notre travail à la technique 'Perturb and Observe' (en français : perturber et observer).

Cette technique *P&O* consiste à perturber la sortie d'une petite valeur autour de point initiale. Selon la réponse du système, on se situe par rapport au MPP. Ce positionnement nous permet de prendre la bonne décision pour atteindre le MPP[25]. La figure 4.16 nous illustre les deux effets de cette perturbation. Le premier, quand on se retrouve à la gauche du MPP, l'augmentation de la tension a tendance à éloigner le système du point de puissance maximale. Le second, quand on se retrouve à la droite du MPP, l'augmentation de la tension a tendance à rapprocher le système du point maximum de puissance. Il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers une stratégie de commande appropriée.

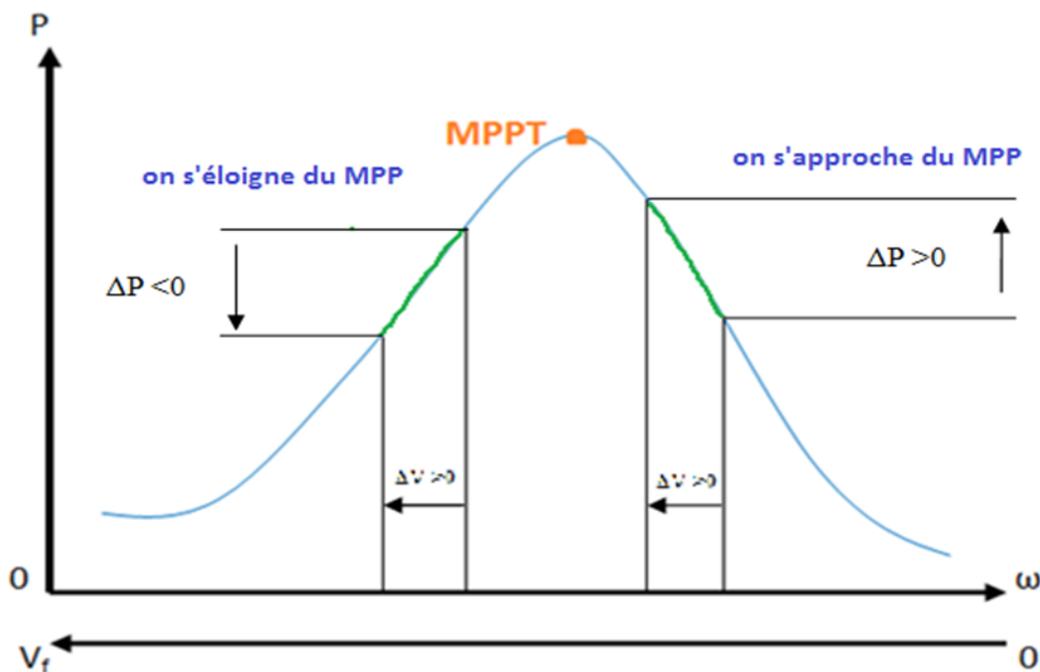


FIGURE 4.16 – L'évolution de la puissance sous l'effet de la perturbation  $\Delta V_f$

En résumé, si à la suite d'une perturbation de tension, la puissance de l'aérogénérateur augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP.

Dans notre travail, nous avons adopté l'algorithme illustré par le logigramme de la figure 4.17.

Les résultats de simulation sont représentés dans les figures 4.18

On remarque de l'allure des deux graphes que la puissance maximale n'est pas atteinte. La puissance extraite suit la même trajectoire que la puissance maximale. Un écart entre les deux courbes est apparent. L'écart entre les courbes est proportionnel à  $\Delta V_f$ . Plus  $\Delta V_f$  est grand, plus l'écart est important. La figure 4.20 nous illustre ce rapport de proportionnalité.

Cette commande permet d'améliorer le rendement mais selon la valeur de  $\Delta V_f$ , deux types de problèmes se posent. Le premier, quand on applique un  $\Delta V_f$  relativement grand,

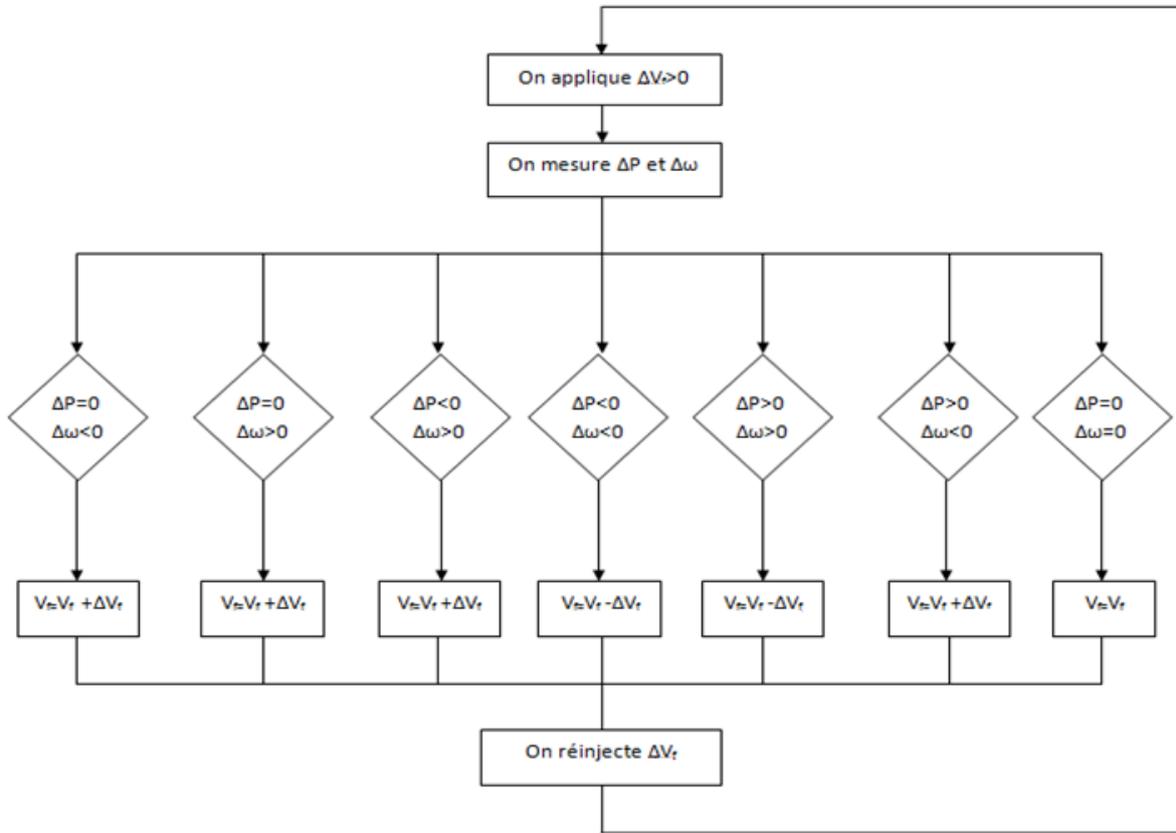


FIGURE 4.17 – Algorithme MPPT  $P&O$

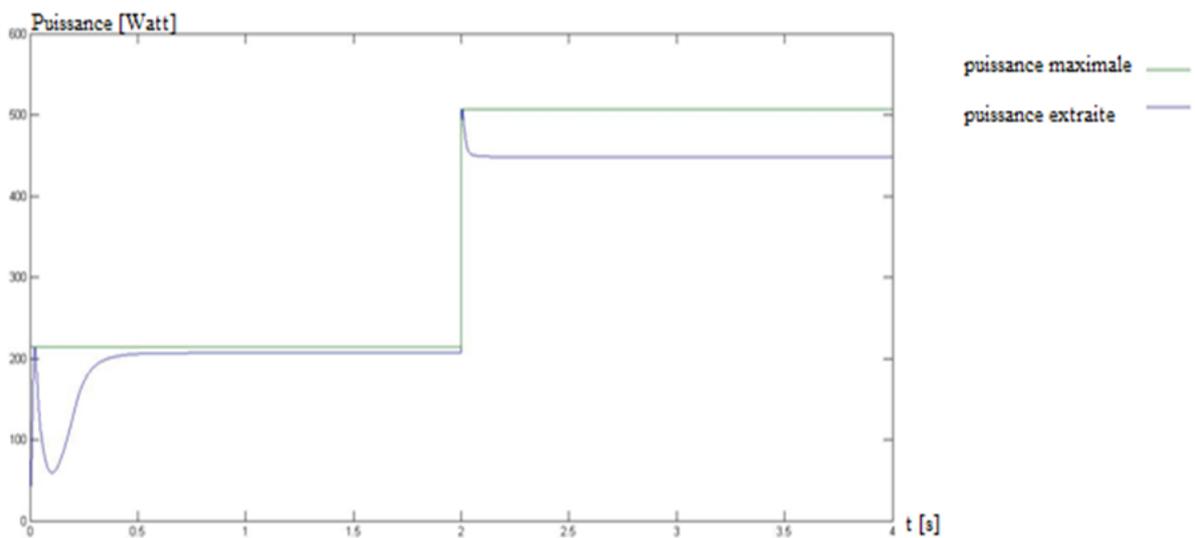


FIGURE 4.18 – Courbe de poursuite de la commande MPPT pour des échelons de vent à vitesse constante

on rate le point de puissance maximale. Le second, pour un choix de  $\Delta V_f$  petit, le temps de convergence de l'algorithme est relativement grand.

La valeur de  $\Delta V_f$  ne doit pas être fixe, on doit la régler de sorte qu'elle assure la

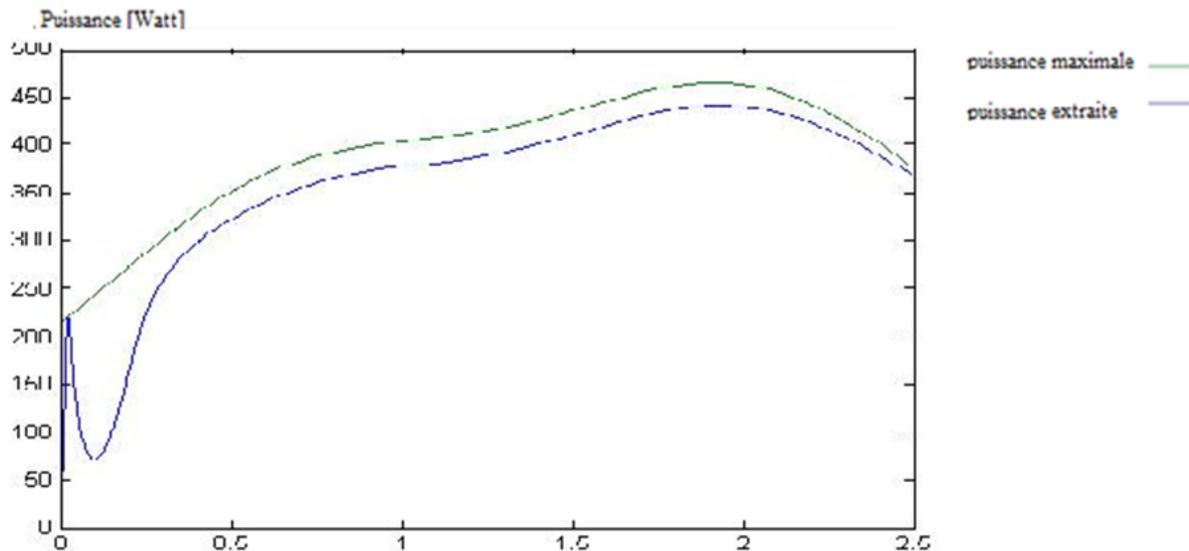


FIGURE 4.19 – Courbe de poursuite de la commande MPPT pour des échelons de vent à vitesse variable

rapidité de convergence lorsqu'on est très loin de point de puissance maximale, et ne pas rater son objectif quand on se trouve au voisinage de ce dernier. Pour cela nous proposons une amélioration à cette commande et cela par l'introduction de la commande floue afin d'avoir  $\Delta V_f$  variable. Le pas de commande s'adaptera selon la position du système par rapport au MPP.

### 4.4.3 Commande MPPT floue

#### Généralités sur la commande floue (Fuzzy control)

Son origine remonte aux années 1920 et 1930, les premières approches du concept d'incertitude d'Heisenberg développées par des chercheurs américains. Mais ses bases théoriques n'ont vu le jour qu'en 1965 dans un article du professeur Iranien Lotfi Zadeh, intitulé «Fuzzy sets» (Ensembles flous).

Dans la théorie des ensembles conventionnels, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, donc le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble ne peut être que nul ou égal à l'unité. Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle  $[0,1]$ .

Ce qui différencie les deux théories provient des limites des ensembles définis. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont « nets », tandis que pour les ensembles flous les contours sont graduels, ou encore flous [23].

Dans la logique floue, les variables ne sont plus des nombres mais bien des variables linguistiques qui sont caractérisées par les éléments suivants :

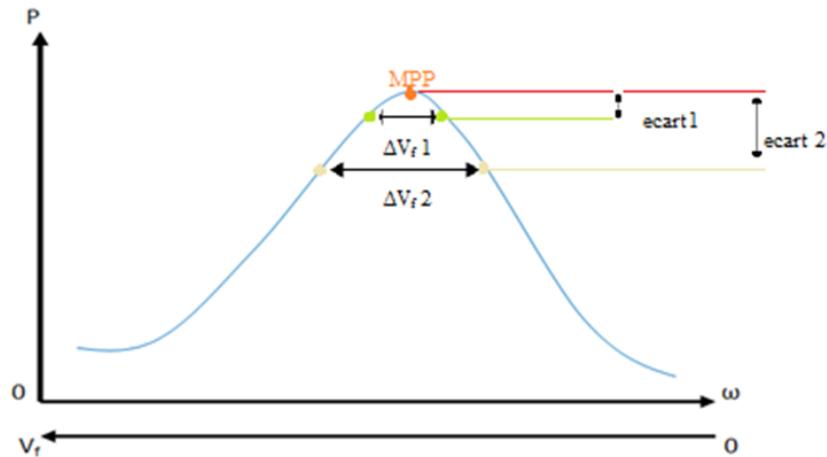


FIGURE 4.20 – Proportionnalité entre le  $\Delta V_f$  et l'écart entre la puissance maximale et la puissance extraite

- Terme linguistique : valeur de la variable linguistique
- Ensemble flou (classe d'appartenance) :  $E$ , l'ensemble qui contient tous les termes linguistiques
- Plage des valeurs de la variable linguistique :
- Fonction d'appartenance :  $\mu_{E(x)}$
- Degré d'appartenance :  $a$
- Univers de discours : l'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue  $x$  et  $\mu_{E(x)}$  est le degré d'appartenance de l'élément  $x$  à l'ensemble flou  $E$ .

### Différentes formes des fonctions d'appartenance

Les fonctions d'appartenance sont issues de l'expérience et des constatations réelles, il n'y a pas de règles systématiques pour déterminer ces fonctions. Elles peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les plus utilisées sont définies par des formes géométriques ou des fonctions, on cite les suivantes : Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale, donc par des segments de droite, les fonctions sont alors dites *linéaires par morceaux*. Dans la plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous.

### Description de commande par la logique floue

Une structure de commande floue comprend 4 blocs principaux :

- Bloc de Fuzzification : les entrées précises deviennent des degrés d'appartenance.
- Base de données : règles et paramètres des fonctions d'appartenance.

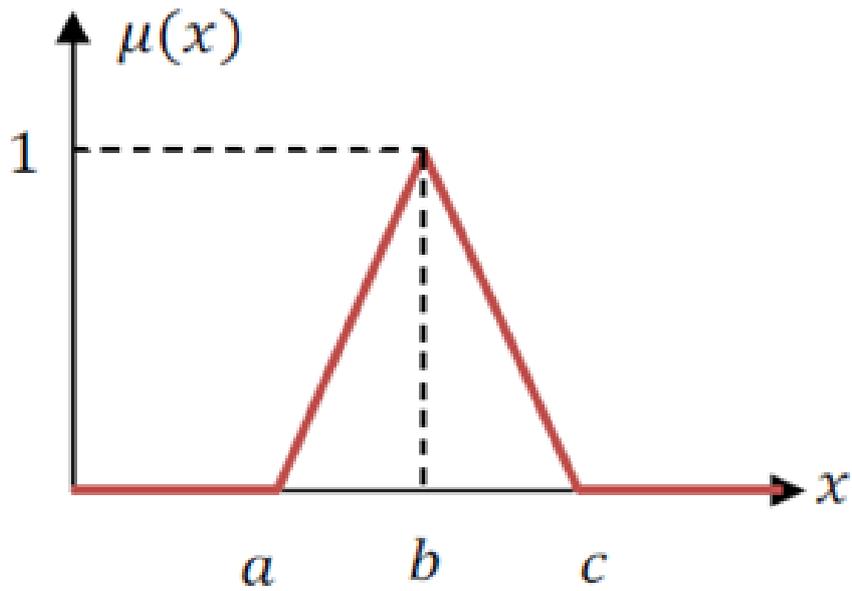


FIGURE 4.21 – Fonction de répartition triangulaire

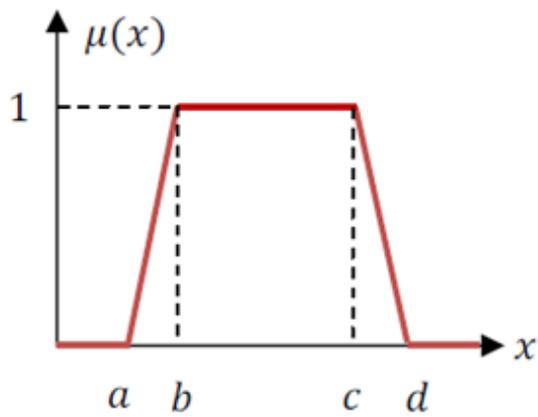


FIGURE 4.22 – Fonction de répartition trapézoïdale

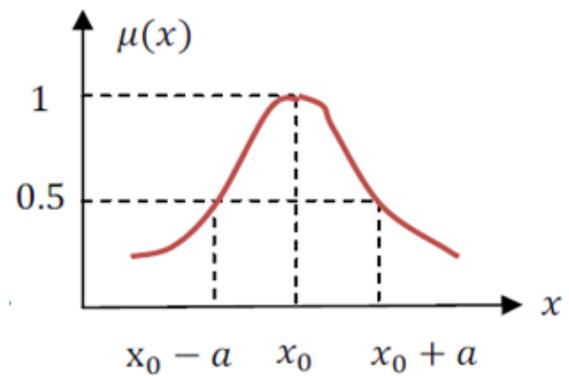


FIGURE 4.23 – Fonction de répartition cloche

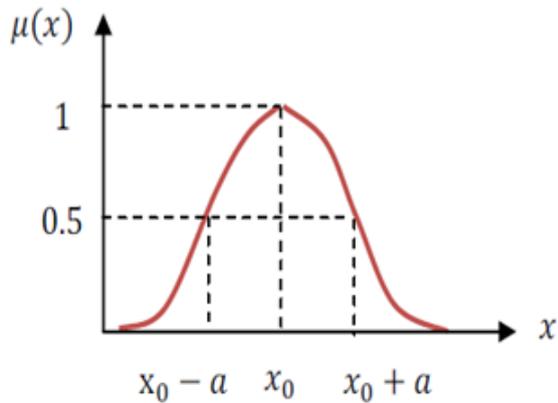


FIGURE 4.24 – Fonction de répartition gaussienne

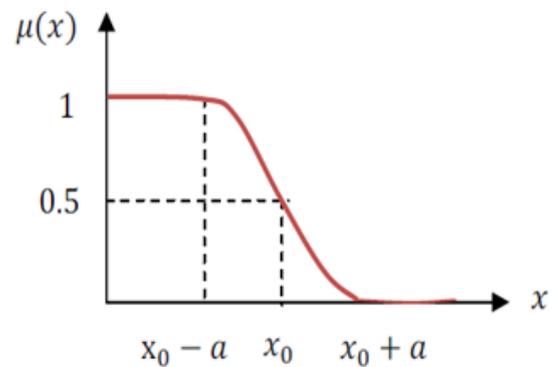


FIGURE 4.25 – Fonction de répartition sigmoïde

- Bloc de décision ou moteur d'inférence (inférence des opérations sur les règles).
- Bloc de defuzzification : les résultats flous deviennent des sorties précises.

La figure 4.26 nous montre la disposition de ces blocs.

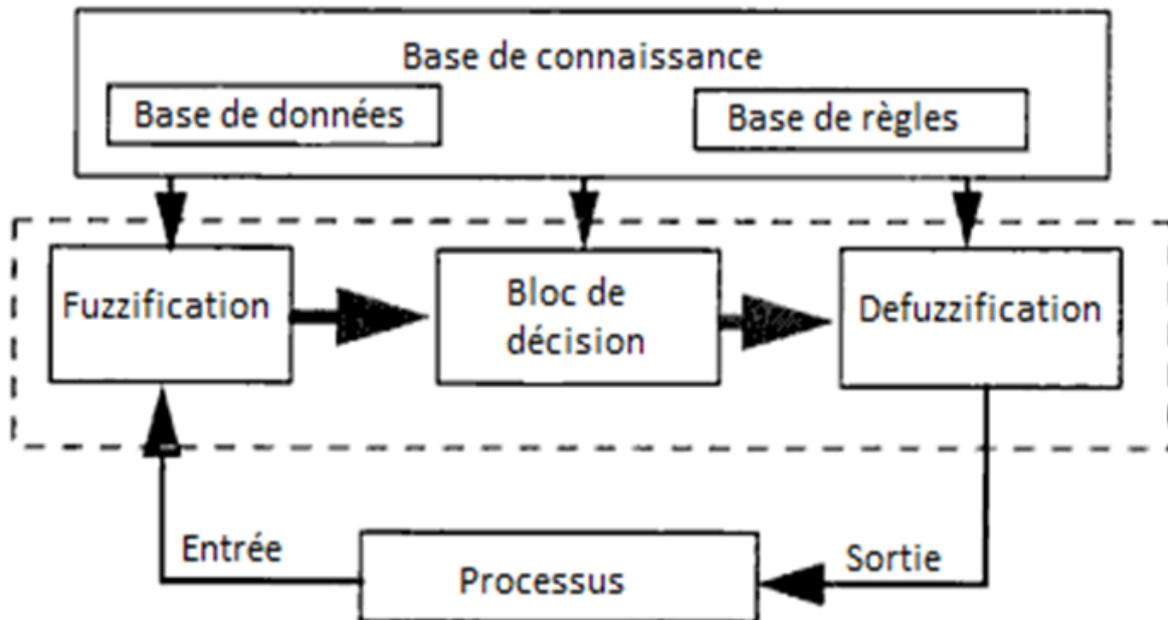


FIGURE 4.26 – Structure générale d'un système de commande basé sur la logique floue [26]

On distingue trois structures majeures de régulateurs à logique floue :

- La structure pure
- La structure de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)
- La structure de Mamdani ou le modèle « fuzzification-defuzzification »

Dans la structure pure les variables d'entrée et de sortie du *RLF* sont des variables floues ou linguistiques. Ceci constitue un handicap étant donné que les entrées et les sorties des régulateurs des systèmes réels sont des variables réelles ou numériques. La structure *TSK* résout ce problème par une transformation des variables linguistiques en variables réelles. L'inconvénient de cette structure est que le conséquent de chaque règle soit une formule mathématique. Mamdani a proposé une interface de défuzzification (défuzzificateur) à la sortie de la structure pure.

### Stratégie de commande MPPT floue

Pour cette commande, on exploite la logique floue pour adapter  $\Delta V_f$  pour une recherche du point de puissance maximale d'une manière plus efficace et plus raffinée que l'algorithme de MPPT avec un pas de tension fixe.

En absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des règles de comportement à appliquer afin de converger vers le point optimal sont relativement simples à établir. Ces règles dépendent des variations de puissance  $\Delta P$  et de vitesse  $\Delta\Omega$ . A partir de l'existence des règles linguistiques, l'utilisation d'un dispositif MPPT (Maximum Power Point Tracking) basé sur le principe des ensembles flous est mise en place. Le dispositif MPPT à base de mesure des variations de puissance  $\Delta P$  et de vitesse de rotation  $\Delta\Omega$  selon les équations [18] :

$$\begin{cases} \Delta P = P[k] - P[k-1] \\ \Delta\Omega = \Omega[k] - \Omega[k-1] \end{cases} \quad (4.11)$$

La figure 4.27 donne un exemple d'une recherche dans le plan puissance-vitesse de rotation, pour une vitesse du vent donnée et constante.

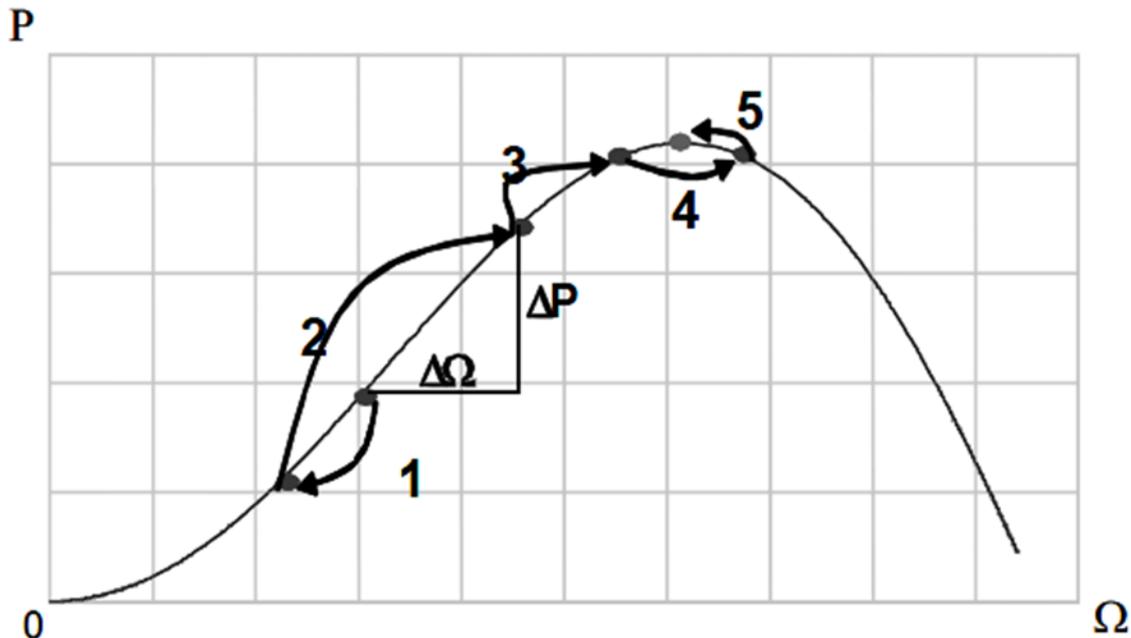


FIGURE 4.27 – Principe de fonctionnement de MPPT flou à vitesse de vent constante [25]

Exemple de règles :

$$\begin{cases} \text{si } \Delta P > 0 \text{ et } \Delta\Omega > 0 \text{ alors } \Delta V_f > 0 \\ \text{si } \Delta P < 0 \text{ et } \Delta\Omega > 0 \text{ alors } \Delta V_f < 0 \\ \vdots \end{cases} \quad (4.12)$$

Ainsi, le changement de  $\Delta P$  résultant de la variation de la vitesse de rotation est soit dans le sens positif soit dans le sens négatif. La valeur de  $\Delta P$  peut aussi être petite ou au contraire grande. A partir de ce jugement, la valeur de la consigne de vitesse est augmentée ou diminuée de façon petite ou respectivement grande dans la direction qui

permet d'augmenter la puissance. Cette commande permet la recherche du point optimum en se basant sur les observations de l'expert. Dans le cas d'un changement de la vitesse du vent, la recherche du point maximal de puissance s'effectue de la manière présentée sur la figure 4.28 : on constate que le même type de règles s'applique.

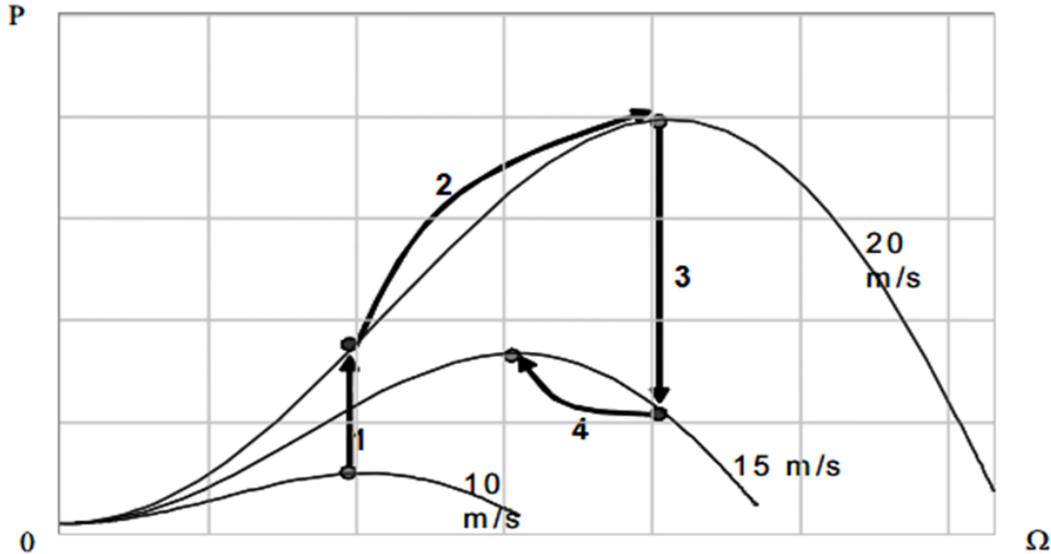


FIGURE 4.28 – Principe de fonctionnement de MPPT floue à vitesse de vent variable [25]

### Établissement des règles pour la commande selon les valeurs de $\Delta P$ et $\Delta \Omega$

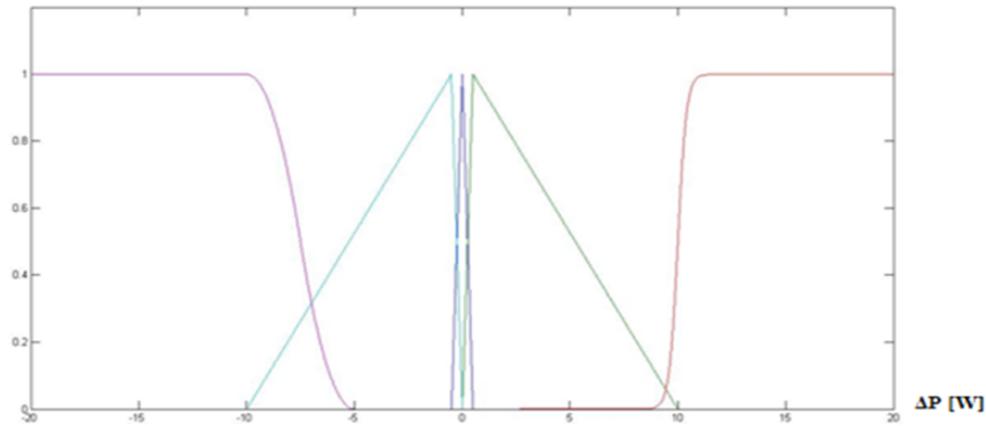
Comme on a vu dans le chapitre précédent, la théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle. Chaque élément flou appartient graduellement aux fonctions d'appartenances (ensembles flous) qui ont été définis à priori.

Pour la variable  $\Delta P$ , elle appartient toujours à deux fonctions d'appartenance. Les fonctions d'appartenances peuvent prendre n'importe quelle forme, dans notre cas elles sont triangulaires sigmoïdes, principalement pour des raisons de simplification des calculs. Pour l'exemple de la figure 4.29 les fonctions d'appartenance de la variable  $\Delta P$  sont :

- PGN (Grand Négatif) : pour des valeurs de  $\Delta P$  inférieures à -10 Watt.
- PPN (Petit Négatif) : pour des valeurs de  $\Delta P$  se trouvant entre -10 Watt et -5 Watt.
- PN(Zéro) : pour des valeurs de  $\Delta P$  se trouvant entre -5 Watt et 5 Watt.
- PGP (Grand Positif) : pour des valeurs de  $\Delta P$  se trouvant entre 5 Watt et 10 Watt.
- PPP (Petit Positif) : pour des valeurs de  $\Delta P$  supérieures à 10Watt.

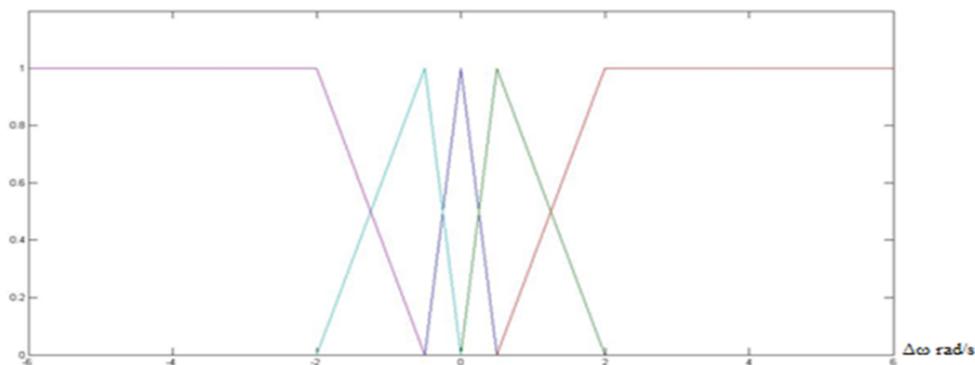
Selon les valeurs de la variable  $\Delta \Omega$ , les règles suivantes sont établies :

- $\Omega$ GN (Grand Négatif) : pour des valeurs de  $\Delta \Omega$  inférieures à  $-2rad/s$ .
- $\Omega$ PN (Petit Négatif) : pour des valeurs de  $\Delta \Omega$  se trouvant entre  $-2rad/s$  et  $-0.5rad/s$ .
- $\Omega$ N(Zéro) : pour des valeurs de  $\Delta \Omega$  se trouvant entre  $-0.5rad/s$  et  $0.5rad/s$ .
- $\Omega$ GP (Grand Positif) : pour des valeurs de  $\Delta \Omega$  se trouvant entre  $0.5rad/s$  et  $2rad/s$ .

FIGURE 4.29 – Fonctions d'appartenance de la variable  $\Delta P$ 

–  $\Omega_{PP}$  (Petit Positif) : pour des valeurs de  $\Delta\Omega$  supérieures à  $2\text{rad/s}$ .

Pour cette variable, les fonctions de répartition sont une fois encore du type triangulaire pour faciliter les calculs et pour assurer le traitement temps réel de l'information (voir figure 4.30).

FIGURE 4.30 – Fonctions d'appartenance de la variable  $\Delta\Omega$ 

A cette étape du processus de calcul flou, la fuzzification des variables d'entrée effectuée est suivie par l'inférence qui consiste à déterminer les degrés d'appartenance des fonctions d'appartenances de sortie à l'aide d'un tableau d'inférence. Ce tableau résume l'ensemble des règles de savoir-faire humain, basées sur l'expérience, la connaissance du système à piloter ainsi que sur une part d'intuition. Il traduit les règles exprimées par le langage courant suivantes :

- Si une augmentation ou une diminution quelconque entraîne une variation nulle de la puissance, on ne fait pas varier la vitesse de rotation (de telle sorte à pouvoir stabiliser le point de fonctionnement sur le sommet de la cloche), c'est-à-dire on maintient la tension  $V_f$  constante.
- Si une variation nulle de la vitesse de rotation entraîne une augmentation de la

$\Delta\Omega \backslash \Delta P$	PGN	PPN	PN	PPP	PGP
$\Omega\text{GN}$	VGN	VPN	VN	VPP	VGP
$\Omega\text{PN}$	VGN	VPN	VN	VPP	VGP
$\Omega\text{N}$	VGP	VPP	VN	VPN	VGN
$\Omega\text{PP}$	VPP	VPP	VN	VPN	VPN
$\Omega\text{GP}$	VGP	VGP	VN	VPN	VGN

TABLE 4.1 – tableau d'inférence de la commande floue

puissance, on en déduit que la vitesse du vent a augmentée, il faut donc augmenter la vitesse de rotation pour se rapprocher de la nouvelle vitesse optimale, donc une diminution de la tension  $V_f$  est requise.

- Si une variation nulle de la vitesse de rotation entraîne une diminution de la puissance, on en déduit que la vitesse du vent a diminué, il faut donc diminuer la vitesse de rotation pour se rapprocher de la nouvelle vitesse optimale se qui est traduit par une augmentation de la  $V_f$ .

Les consignes de  $\Delta V_f$  peuvent être interprétées comme suit :

$$\begin{aligned}
 \text{VGP} &\rightarrow 15\text{V} \\
 \text{VPP} &\rightarrow 3\text{V} \\
 \text{VN} &\rightarrow 0\text{V} \\
 \text{VPN} &\rightarrow -3\text{V} \\
 \text{VGN} &\rightarrow -15\text{V}
 \end{aligned}$$

Ces valeurs sont déterminées à partir d'une série de simulations sur le modèle. Le tableau 4.1 résume l'ensemble de la stratégie de commande MPPT floue. L'implémentation de cette dernière est représentée dans la figure 4.31.

Les simulations ont donné les résultats présentés dans les figures 4.32 et 4.33. La première représente le test de la commande pour des échelons de vent de vitesses constantes. La seconde représente la poursuite de système pour un vent de vitesse variable.

On remarque que pour cette commande la poursuite est presque parfaite. Le petit écart est dû au choix des valeurs de  $\Delta V_f$ . Malgré qu'on ne connaît pas la valeur du vent mais avec la commande MPPT mixée à la logique floue on a pu poursuivre le point de puissance maximal. Cette technique a permis de réduire considérablement l'écart entre la puissance extraite et la puissance maximale pour le rendre presque nul. On remarque que la commande n'est pas sensible aux variations de la vitesse du vent.

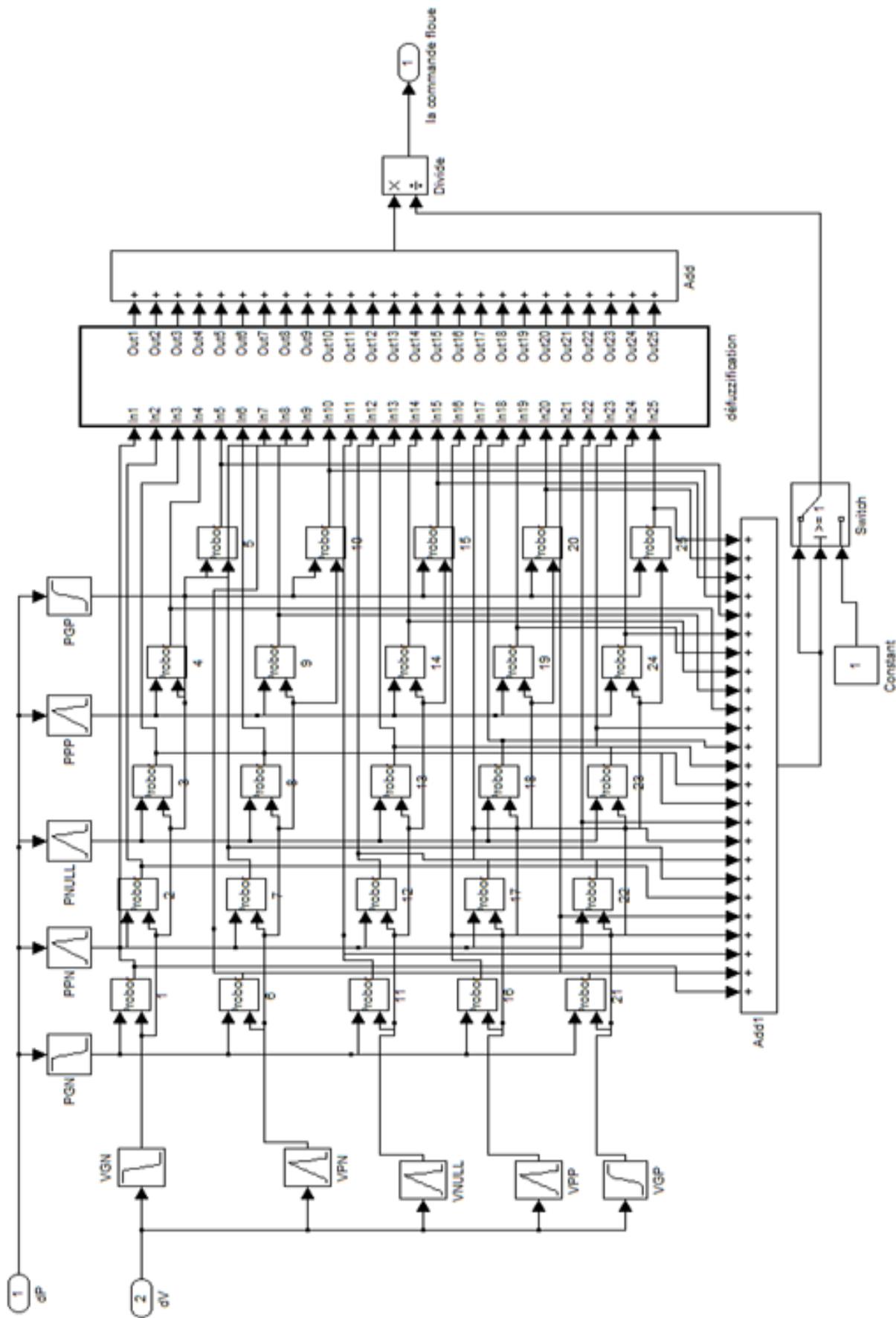


FIGURE 4.31 – Schéma de simulation du bloc de commande floue

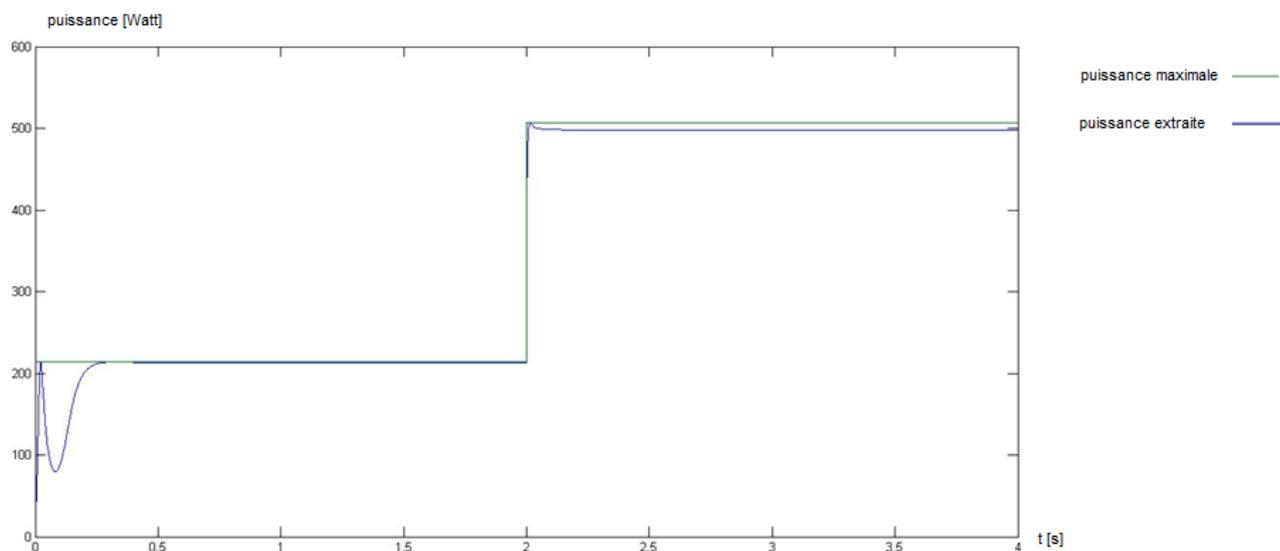


FIGURE 4.32 – Courbe de poursuite de la commande MPPT-floue pour des échelons de vent à vitesse constante

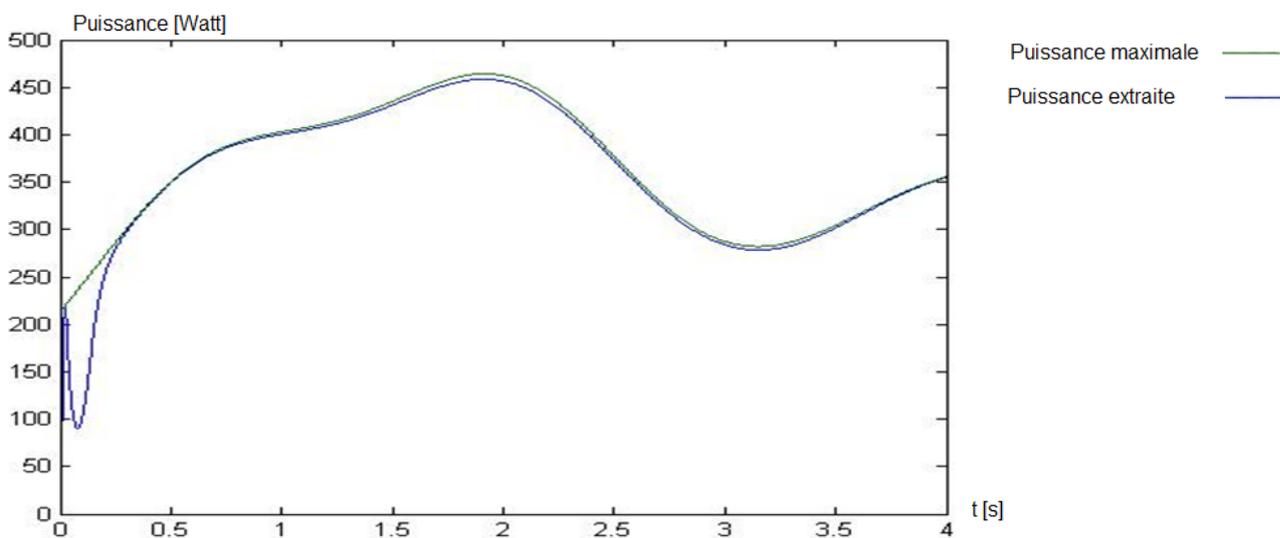


FIGURE 4.33 – Courbe de poursuite de la commande MPPT-floue pour des échelons de vent à vitesse variable

# Conclusion et perspectives

Notre travail a été consacré à la modélisation et à la commande d'une éolienne double-rotor associée à une génératrice synchrone à roue polaire.

Dans la première partie, nous avons développé et exposé les principaux types d'éoliennes utilisées actuellement .

Une modélisation de l'éolienne double-rotor et une énumération des différentes technologies de conversion électrique et d'excitation de la génératrice ont été traitées dans le deuxième chapitre. Nous avons pu estimer le coefficient de puissance de l'éolienne proposée en tenant compte du modèle mécanique. Le rendement maximum atteint est de 61.26% dépassant ainsi la limite de BETZ. Notre objectif a été atteint.

Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation de l'ensemble génératrice, redresseur et hacheur Buck. La tension du bus-continu est maintenue constante à l'aide d'un hacheur. Un deuxième hacheur assure l'excitation de la roue polaire.

Le dernier chapitre présente la commande de la génératrice pour une utilisation optimale avec une extraction maximale de l'énergie du vent. La première commande utilise un régulateur classique de type  $PI$  en mesurant la vitesse du vent tout en estimant le  $C_p$  de l'éolienne. Les résultats obtenus sont présentés et commentés. La deuxième commande a ciblé la recherche du point maximum de puissance. Un algorithme MPPT basé sur la méthode P&O a été développé. Les premiers résultats obtenus montrent une erreur relativement importante. Ceci est dû au choix de  $\Delta V_f$ . Une amélioration de l'algorithme a été apportée en ajoutant un régulateur flou. Ceci a permis d'adapter le  $\Delta V_f$  à la position du point de fonctionnement par rapport aux point maximum de puissance. Les résultats obtenus sont intéressants et se rapprochent des résultats obtenus par la commande de type  $PI$ . Seulement, cette méthode est robuste par rapport à la première qui dépend de la voilure ( $C_p$ ).

Ce mémoire représentera une base pour d'éventuels travaux futurs. On propose les perspectives suivantes :

- Étudier une structure avec un nombre de rotor supérieur à deux.
- Utiliser des éoliennes intégrées dans un carénage de type Turbolienne.

# Bibliographie

- [1] Adam MIRECKI, Étude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [2] Olivier GERGAUD, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de productions éoliennes et photovoltaïques couplé au réseau et associé à un accumulateur, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 9 décembre 2002.
- [3] Hamid BEN AHMED , Bernard MULTON, Christian NICHITA, Xavier ROBOAM, Olivier GERGAUD, Brayima DAKYO , Aérogénérateurs électriques techniques d'ingénieur, référence d3960
- [4] Manuel Franquesa VONSCHEN « introduction à la théorie des éoliennes » 1989
- [5] Philippe LECONTE , Marc RAPIN, Edmond SZECHENYI, Eolienne technique d'ingénieur
- [6] Miguel LOPEZ, Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée, université Paris 11, faculté des sciences d'Orsay, 2008
- [7] Statoéolien présentation technique : [www.gual-industrie.com](http://www.gual-industrie.com).
- [8] wind-it la rencontre du pilon électrique et l'éolien : [www.windit.fr](http://www.windit.fr).
- [9] Eolienne BSB, Innov'up Site EERIE, parc scientifique George Besse : [www.bsb.new.fr](http://www.bsb.new.fr).
- [10] <http://www.matin.qc.ca/environnement/upload/2007/08/storan%20Design%20details.jpg>
- [11] Riadh W. Y. Habash and Voicu Groza School of Information Technology and Engineering, University of Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada, Pierre Guillemette TRIAS Innovations, Ottawa, Ontario, Canada, Performance Optimization of a Dual-Rotor Wind Turbine System. 2010
- [12] Ehsan Mostery Farahani, Nasser Hosseinzadeh, Mehran Motamed Ektesabi Swinburne University of Technology, Comparison of Dynamic Responses of Dual and Single Rotor Wind Turbines under Transient, Melbourne Australia. Dec 2010.
- [13] E.M.Farahani, N.Hosseinzadeh, M.M.Ektesabi, SSR Risk Alleviation in Dual-Rotor Wind Turbine by Employing Genetic Solutions, 2010.

- [14] HAMDI Naouel, thèse de magister, Modélisation et commande des génératrices éoliennes, université de Constantine, 2008.
- [15] Abdelmalek BOULAHIA, Étude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'énergie Électrique, thèse de Magister, Université de Constantine, Avril 2009.
- [16] Duc-Hoan TRAN, Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale, Doctorat de l'université de Toulouse, Septembre 2010.
- [17] A.M De Broe, S. Drouilhet, and V. Gevorgian, A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1630-1635, December 1999.
- [18] techno-science.net <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3209>
- [19] Robert THIBAUT, Contrôle de l'énergie injectée dans un réseau électrique par un convertisseur triphasé utilisant un régulateur basé sur un modèle interne sinusoïdale, école de technologie supérieure université de Québec, 2006.
- [20] Rubi Garcia Hernandez, Modeling and control of a Wind Turbine Synchronous Generator, Institute of Electrical Research (Mexico), 2011.
- [21] Pierre WETZER, Machines Synchrones, Excitation, Technique de l'ingénieur d3545
- [22] Ermis, M., Ertan, H.B., Akpınar, E. and Ulgut, F. (1992). Autonomous wind energy conversion system with a simple controller for maximum-power transfer, IEE Proceedings-B, 139(5), 421-428
- [23] TOUAL Belkacem, Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable, thèse de magister, Université de Batna, 17 Octobre 2010
- [24] Boumediene Abdelmadjid, Recherche et Développement de Nouvelles Approches de Commandes d'une machine Synchrones Autopilotée Alimentée en Tension, Doctorat d'État en Automatique, ENP Alger, Décembre 2007.
- [25] TALBI Said, RIAH Rachid, Comparaison et Synthèse d'un Nouvel Algorithme MPPT Robuste pour une Chaîne de Production d'Énergie Photovoltaïque, Projet de fin d'études, ENP d'Alger, juin 2007
- [26] Jelena GODJEVAC, Idées nettes sur la logique floue, Collection informatique 1999, ISBN : 2.88074.378-8.