

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Département d'Electronique

Ecole Doctorale en Energies Renouvelables

Mémoire de Magister

Présenté par :

BELLARBI Samir

En vue de l'obtention du titre de

Magister en Energies Renouvelables

Thème

**Simulation de chaînes de conversion
d'énergie appliquée à une éolienne
de type Savonius**

Soutenu le 07 Février 2010 devant le jury composé de :

M. A. SMAILI, Professeur, ENP

Président

M. A. MALEK, Maître de Recherches, CDER

Rapporteur

M. M. HADDADI, Professeur, ENP

Examineur

M. M. S.AIT-CHEIKH, Maître de conférences, ENP

Examineur

M. C. LARBES, Maître de Conférences, ENP

Examineur

Ecole Nationale Supérieur Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach,

Remerciements

Je tiens vivement à remercier Monsieur MALEK Ali, MC, CDER, pour avoir proposé un sujet aussi intéressant, pour la confiance et l'intérêt qu'il m'a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur A. SMAILI, Mc, ENSP, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens également à remercier Monsieur LARBES Chérif, MC, ENSP, pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury.

Je tiens également à remercier Monsieur AIT-CHEIKH Md Salah, ENSP pour l'honneur qu'il me fait en participant au jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur HADDADI Mourad, Pr, ENSP, pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail en participant au jury.

Je tiens également à remercier tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'élaboration de ce travail. Mes remerciements vont aussi vers le chef de département d'électronique Mr Hichem BOUSBLA.

Je voudrais remercier tout particulièrement mes parents ainsi que mes frères, mes sœurs et ma tante pour leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de mon cursus.

ملخص

تهدف دراستنا هذه إلى المقارنة بين مختلف التركيبات واستراتيجيات تسيير الطاقة والتحكم فيها المطبقة على التربين ذو أجنحة سافونيز (VAWT) ، ولهذا الغرض نستعمل التقنية MPP لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى والحصول على مردود طاقي أعظمي. كما يمكن تحقيق التحكم المباشر باستعمال المقوم MLI أو غير المباشر وهذا بمراقبة تيار الجهة المستمرة، نفرض ان الخصائص التقنية للأجنحة مجهولة، في هذه الحالة يكون البحث بواسطة المنطق الغامض باستعمال الاشورالمخفض و المتناظر.

المقارنات الطاقوية بتطبيق سرعات رياح مختلفة و متغيرة تسمح لنا بدراسة مختلف التركيبات واستراتيجيات التحكم.

كلمات مفتاحيه : التربين - تتبع نقطة الاستطاعة العظمى- المحاكاة - تسيير الطاقة - المنطق الغامض -الهندسة.

Résumé

L'étude présente un comparatif des architectures et des stratégies de gestion d'énergie dédiées à un système éolien basé sur les voilures de type Savonius ((Vertical Axis Wind Turbine) VAWT). Un dispositif MPPT (Maximum Power Point Tracking) doit être introduit en vue d'obtenir un rendement énergétique maximal. Un pilotage direct par un redresseur MLI ou indirect par le contrôle du courant du côté du bus continu est possible. En supposant la caractéristique de voile inconnue, une recherche par logique floue est envisagée. Afin de minimiser les coûts de la chaîne de conversion statique des structures simples (redresseur à diodes et un hacheur dévolteur) sont étudiées et comparées avec un montage reposant sur le redresseur MLI. Les comparaisons énergétiques à des vitesses de vent variables ont alors permis d'évaluer les différentes structures et stratégies de pilotage.

Mots clés : Eolien, MPPT, Modélisation, Gestion d'énergie, logique floue, Architecture.

Abstract

This study presents a comparison of architectures and strategies of energy management dedicated to VAWT turbines such as Savonius. A Maximum Power Point Tracking must be implemented in order to optimize the energetic behavior. A direct control of the PWM Voltage Source Inverter or an indirect control of the DC bus current is possible. In the fact that the wind turbine characteristic is unknown, an operational research based on fuzzy logic is proposed. Aiming to minimize the cost of the static conversion structure, simple structures (diode bridge inverter, associated with DC-DC chopper) are analyzed and compared with a system based on a PWM Voltage Source Inverter. Comparisons of the provided energy are made for different wind speeds allowing evaluating the performance of each structure and of the control strategies.

Keywords: Wind turbine, MPPT, Model, Energy management, fuzzy logic, Architectures.

Introduction générale.....	01
Chapitre 1 : Ressources Energétiques Renouvelables et Systèmes de Production Décentralisé Eolienne d'origine Renouvelable	
1.1 Introduction.....	02
1.2 Energies renouvelables, définition, ressources et exploitation.....	02
1.2.1 La production de chaleur par les sources renouvelables.....	03
1.2.2 La production d'électricité par les énergies renouvelables.....	04
1.3 Transformation de l'énergie du vent en électricité.....	06
1.3.1 Notions théoriques sur l'éolien.....	06
1.3.1.1 Loi de Betz – notions théoriques.....	06
1.3.1.2 Evaluation de production éolienne.....	07
1.3.2 Différentes types d'aérogénérateurs – caractéristiques C_p	09
1.3.2.1 Axe horizontal (HAWT).....	10
1.3.2.2 Axe vertical (VAWT).....	11
1.3.3 Vitesse variable et l'éolien.....	11
1.4 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne.....	12
1.4.1 Génératrices asynchrones à cage.....	12
1.4.2 Génératrices asynchrones à rotor bobiné.....	13
1.4.3 Génératrices synchrones.....	14
1.5 Systèmes en site isolé.....	15
1.5.1 Les caractéristiques de petites éoliennes	16
1.5.2 Optimisation de la forme de voilure d'une Savonius.....	18
1.6 Dispositifs de stockage de l'énergie.....	19
1.7 Conclusion.....	19
Chapitre 2 : Modélisation et Simulation des structures étudiées	
2.1 Introduction.....	20
2.2 Modélisation de la chaîne éolienne de petite puissance.....	20
2.2.1 Approche simulation.....	21
2.2.2 Modélisation de la vitesse du vent.....	21
2.2.3 Modélisation de la voilure.....	22
2.2.4 Simulation informatique de la voilure.....	23
2.3 Machine synchrone à aimants permanents.....	25

2.3.1 Caractéristiques de la machine WR-02.....	25
2.3.2 Modèle de la machine sous PSIM.....	26
2.4 Les convertisseurs statiques.....	27
2.4.1 Pont de diodes.....	27
2.4.2 Hacheur dévolteur.....	28
2.4.3 Hacheur en pont à commande différentielle.....	31
2.4.4 Redresseur triphasé à contrôle vectoriel par MLI.....	34
2.5 Batterie.....	37
2.6 Conclusion.....	38

Chapitre 3 : Méthodes de Recherche du Point de Puissance Maximale

3 Introduction.....	39
3.1 Les courbes caractéristiques de la voileure Savonius	39
3.2 Maximisation de puissance sans connaissance de $C_p(\lambda)$	40
3.2.1 MPPT par la logique floue.....	40
3.2.2 Définition de la logique floue.....	42
3.2.3 Simulations de l'algorithme MPPT à logique floue.....	46
3.2.4 Mise en évidence des problèmes de Tracking.....	47
3.3 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la voileure.....	47
3.3.1 Commande indirecte par le pilotage du courant de charge.....	48
3.3.1.1 MPPT coté DC.....	48
3.3.1.2 Hacheur dévolteur simple.....	49
3.3.1.3 Hacheur en pont à commande différentielle.....	50
3.4 Conclusion.....	51

Chapitre 4 : Résultats de simulation et discussion

4 Introduction.....	52
4.1 Résultats de simulation sans connaissance de $C_p(\lambda)$	52
4.2 Résultats de simulation avec la connaissance de $C_p(\lambda)$	58
4.2.1 Commande indirecte par le pilotage du courant de charge.....	58
4.2.1.1 MPPT coté DC.....	58
4.2.1.2 Hacheur dévolteur simple.....	59
4.2.1.3 Hacheur en pont à commande différentielle.....	62

4.3 Comparaison de l'efficacité énergétique dans le temps.....	64
4.3.1 Efficacité énergétique	65
4.4 Résultats de simulation obtenue à vitesse de vent linéaire.....	65
4.4.1 Résultats de simulation sans connaissance de $C_p(\lambda)$	66
4.4.2 Résultats de simulation avec la connaissance de $C_p(\lambda)$	67
4.4.2.1 Résultats de simulation pour l'hacheur dévolteur simple.....	67
4.4.2.2 Résultats de simulation pour l'hacheur asymétrique.....	68
4.5 Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	71
Références Bibliographiques.....	72

Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs pays sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite "renouvelable", cette énergie est l'énergie éolienne. Elle apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire.

Plusieurs exemples des pays qui ont réussi à exploiter cette énergie, l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 19 GW, l'Espagne, numéro deux de l'Union Européenne avec 10,35 GW et le Danemark avec 3,3 GW à la fin de l'année 2007. L'Algérie n'a aucune installation éolienne malgré l'existence des conditions climatiques qui favorables à l'utilisation en l'énergie.

Notre travail consiste à une étude comparative de différentes chaînes de conversion éolienne de petite puissance pour un choix optimale d'un système avec un surcot réduit. Le mémoire s'articule en trois parties principales :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les principales énergies renouvelables et les systèmes éoliens décentralisé avec un concept détaillé de système éolienne de petite puissance basé sur une voile de type Savonius.

Le second chapitre présente la modélisation et simulation du fonctionnement des systèmes étudiés (voilure Savonius et génératrice synchrone à aimant permanent, pont à diodes, redresseur MLI, hacheur dévolteur et différentiel et batterie).

Le troisième chapitre est consacré à une étude statique. L'association des éléments décrits dans le chapitre précédent permet d'avoir une vision globale de la chaîne de conversion d'énergie.

Enfin, Les résultats de calculs numériques permettent une comparaison énergétique entre les différentes configurations matérielles conjuguées avec les stratégies de commande MPPT développées. Un bilan global du compromis coût / efficacité est enfin proposé pour conclure.

1.1 Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

Après un bref bilan des ressources énergétiques exploitables, nous nous intéresserons dans ce chapitre aux systèmes de production existant, en particulier la génération électrique par des éoliennes des petites puissances, nous finirons ce chapitre en précisant la problématique que nous avons définie dans ce mémoire.

1.2 Énergies renouvelables, définition, ressources et exploitation

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [1].

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIXème siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire. De plus, une grande

partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. Même au sein de sud Algérienne de tels "sites isolés" ne sont pas exceptionnels. Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde [2].

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles [3] à plusieurs titres :

- elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- elles sont inépuisables ;
- elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux;
- elles offrent une importante indépendance énergétique.

Compte tenu de deux usages importants de l'énergie, chaleur et électricité, on classera les énergies renouvelables en deux groupes.

1.2.1 La production de chaleur par les sources renouvelables

Les sources d'énergies renouvelables permettent d'abord de produire de l'énergie thermique, ainsi le bois, le biogaz, le soleil et la géothermie sont largement exploités pour cela. Le soleil, ressource majeure, reste encore peu exploité mais son potentiel de développement est énorme, parmi ces sources de la production de chaleur [4] :

- Le bois-énergie (Le bois-énergie représente 14 % de la consommation énergétique primaire mondiale) [4].
- La méthanisation – le biogaz (La méthanisation est un phénomène biologique par lequel la matière organique est transformée en biogaz par des bactéries vivant en l'absence d'oxygène).
- Le solaire thermique (Le solaire thermique basse température permet essentiellement le chauffage de l'eau sanitaire et, dans une moindre mesure, la production combinée de chauffage par plancher chauffant (plancher solaire direct)).
- La géothermie (La géothermie est l'extraction d'énergie contenue dans le sol).

1.2.2 La production d'électricité par les énergies renouvelables

Les sources d'énergie disponibles dans notre environnement proche et permettant de produire de l'électricité sont : l'eau, le soleil et le vent. Directement compétitives pour les sites isolés (les coûts de raccordement au réseau électrique sont très élevés), les centrales électriques à sources renouvelables peuvent aussi, sous certaines conditions, être directement raccordées au réseau. Le développement de l'électricité renouvelable est freiné par le prix de rachat. Parmi ces sources de la production de l'électricité [5] :

- Les centrales hydrauliques (Les quantité globales pluviales tombant sur le territoire Algérien sont importantes est estimé à 65 milliards de m³. Schématiquement les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation.

Tableaux 1-1 : Parc de production hydroélectrique en Algérie [5].

Centrale	Puissance installé en MW
Darguina	71,5
Ighil Emda	24
Mansouria	100
Erraguene	16
Souk El Djemaa	8,085
Tizi Meden	4,458
Ighzernchebel	2,712
Ghrib	7
Gouriet	6,425
Bouhanifia	5,7
Oued Fodda	15,6
Beni Behede	3,5
Tessala	4,228

- Le solaire photovoltaïque (l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire nationale dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5kWh sur la majeure partie du territoire nationale, soit près de 1700kWh/m^2 par an au Nord et $2263\text{kWh/m}^2/\text{an}$ au sud du pays)[5].
- La biomasse (Résidus de bois, d'olive ou de coton, sous-produits de l'agriculture et de l'élevage, Le potentiel en Biomasse actuel en Algérie est évalué à environ 37 Million de TEP (Tonnes équivalent pétrole), le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%. 5 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés, ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1,33 millions de TEP/an) [5].
- L'éolien (La puissance éolienne mondiale s'établit désormais à 57 837 MW au 2005, ce qui correspond à un taux de croissance annuel moyen de 28,4 % par an depuis dix ans. Le processus de globalisation du marché éolien est de plus en plus marqué, le marché européen ne représentant plus que 60,3 % du marché mondial contre 71,6 % en 2004, Cette situation s'explique à la fois par une croissance significative du marché asiatique (indien en particulier), mais également par une forte augmentation du niveau d'installation aux États-Unis. La reconduction de la *Production Tax Credit* (PTC) américaine jusqu'en 2007 a rassuré les investisseurs américains qui ont installé plus de 2 400 MW en 2004. L'Algérie n'a aucune installation éolienne malgré l'existence des conditions climatiques qui accompagnent l'utilisation de cette énergie (régime de vent modéré (2 à 6m/s)). ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les hauts plateaux ou pour des installations éoliennes dans le sud qui dispose de vitesse de vent dépassant de 6 m/s, notamment dans la région Sud Ouest) [5].

1.3 Transformation de l'énergie du vent en électricité

1.3.1 Notions théoriques sur l'éolien

1.3.1.1 Loi de Betz – notions théoriques

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par :

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_V^3 \quad (1-1)$$

Où : ρ : la masse volumique de l'aire, V_V : la vitesse locale de vent.

Selon la loi de Betz [6] [7], cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{MAX} = \frac{16}{27} P_V \quad (1-2)$$

la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_{P_{Max}} = \frac{P_{MAX}}{P_V} = \frac{2 \cdot P_{MAX}}{\rho \cdot S \cdot V_V^3} = 0.59 \quad (1-3)$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure [7]. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent :

$$C_P = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot S \cdot V_V^3} \quad (1-4)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite λ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_V} \quad (1-5)$$

La Figure 1.1 montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, 3 et 4 pales. On remarque que pour chaque type d'éolienne correspond une vitesse normalisée, λ_{opt} , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester

sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique $C_p(\lambda)$ sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale.

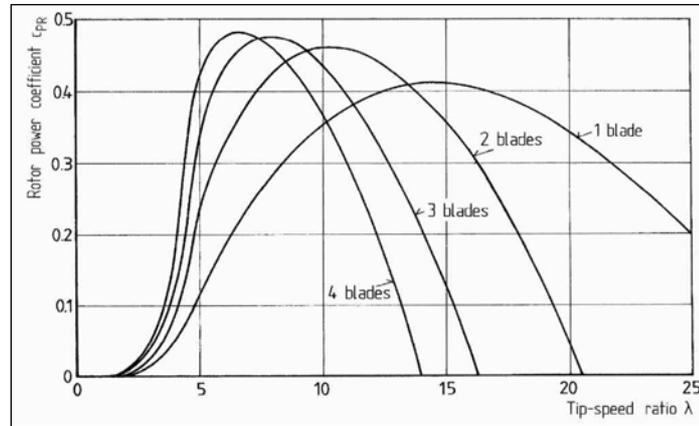


Figure 1.1 : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée [7].

1.3.1.2 Evaluation de production éolienne

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps, sont nécessaires (un à dix ans).

En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent augmente selon la hauteur. L'expression (1-6) donne la méthode de ce calcul et le Tableau 1-1 les valeurs de rugosité α en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement proche. On précise que h est la hauteur du mat et h_{mes} la hauteur des appareils de mesure [8].

$$V_V(h) = V_V(h_{mes}) \cdot \frac{\text{Ln}(h / \alpha)}{\text{Ln}(h_{mes} / \alpha)} \quad (1-6)$$

Tableaux 1-2 : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement [8].

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0,0002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0,0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0,03
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0,055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0,1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0,2
Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés	0,4
Grandes villes avec bâtiments hauts	0,8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1,6

Chaque site éolien est caractérisé par une direction de la vitesse de vent dominante. Cependant, elle est variable comme la valeur de la vitesse du vent. Pour décrire ces propriétés spatiotemporelles le diagramme appelé rose des vents peut être élaboré. Il se présente comme un diagramme polaire, lequel répertorie l'énergie du vent disponible dans chaque direction en pourcent (parfois c'est la vitesse) et le temps de l'occurrence de chaque direction du vent en pourcent. L'exemple est donné par la Figure 1.2.

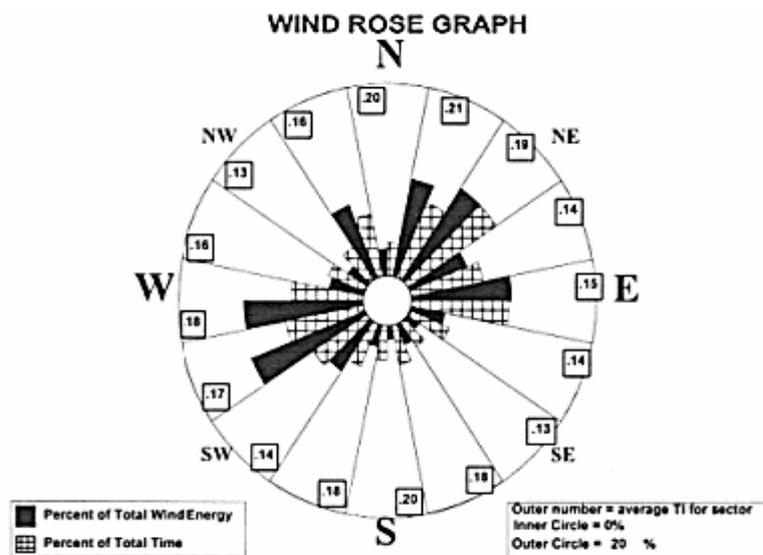


Figure 1.2 : Exemple de la rose des vents [8].

La rose du vent permet d'avoir une première vue sur la capacité énergétique du site éolien mais elle est destinée plutôt à l'aide au choix de l'emplacement spatial de la turbine et principalement pour éviter les obstacles qui peuvent gêner le flux d'air. Des informations supplémentaires peuvent être insérées dans ce graphique comme la turbulence ou la rugosité du terrain. Parmi les modèles mathématiques utilisés en énergie éolienne, le modèle statistique de la distribution de Weibull s'avère le plus approprié pour la description de la variation de la vitesse du vent.

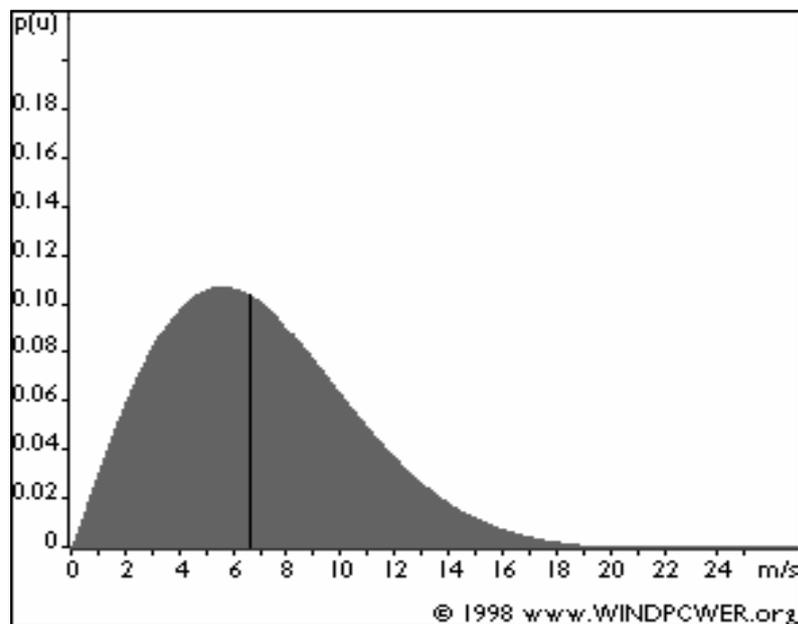


Figure 1.3 : Exemple de la distribution de Weibull [8].

1.3.2 Différents types d'aérogénérateurs – caractéristiques C_p

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux familles de voilures existent : les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT). Le graphique de la Figure 1-4 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes :

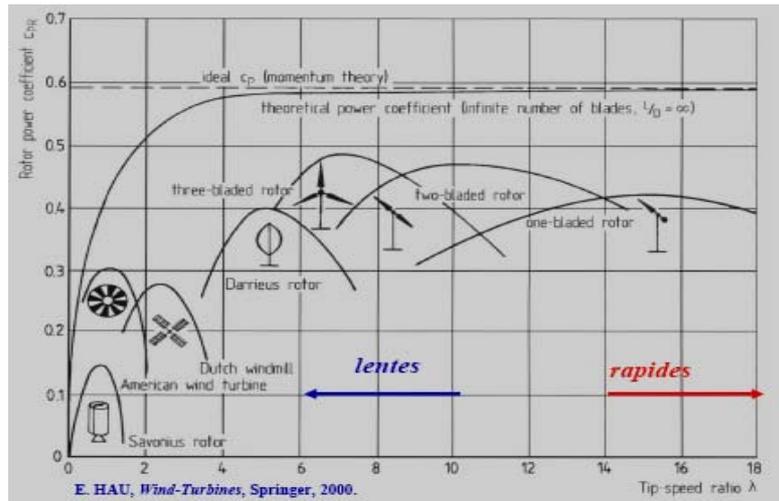
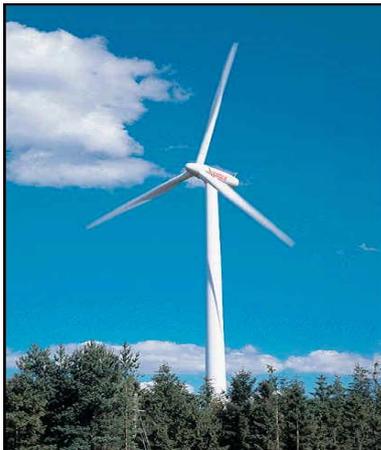


Figure 1.4 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs [9].

1.3.2.1 Axe horizontal (HAWT)



Eolienne tripales



Eolienne multipales

Figure 1.5 : les éoliennes à axe horizontal [9].

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales. La caractéristique de puissance $C_p(\lambda)$ dépend principalement du nombre de pales comme le montre la Figure 1.4 et des propriétés aérodynamiques de la voilure (coefficient de poussée C_F , coefficient de couple C_M ...) [9].

1.3.2.2 Axe vertical (VAWT)



Darius



Darius de type H



Savonius

Figure 1.6 : les éoliennes à axe vertical [9]

Une autre famille d'éoliennes est basée sur les voilures à l'axe vertical. Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application. Il existe principalement deux technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), les turbines Darrieus classique ou à pales droites et la turbine de type Savonius, comme montré à la Figure 1.6. Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales [9].

1.3.2 Vitesse variable et l'éolien

Si on considère les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (λ_{opt}). Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique. La figure 1.7 montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage de vitesse dans une plage de 1 à 2 est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques. Nous verrons dans ce qui suit différents ensembles convertisseurs-machines utilisés ou utilisables dans la génération éolienne d'énergie [10].

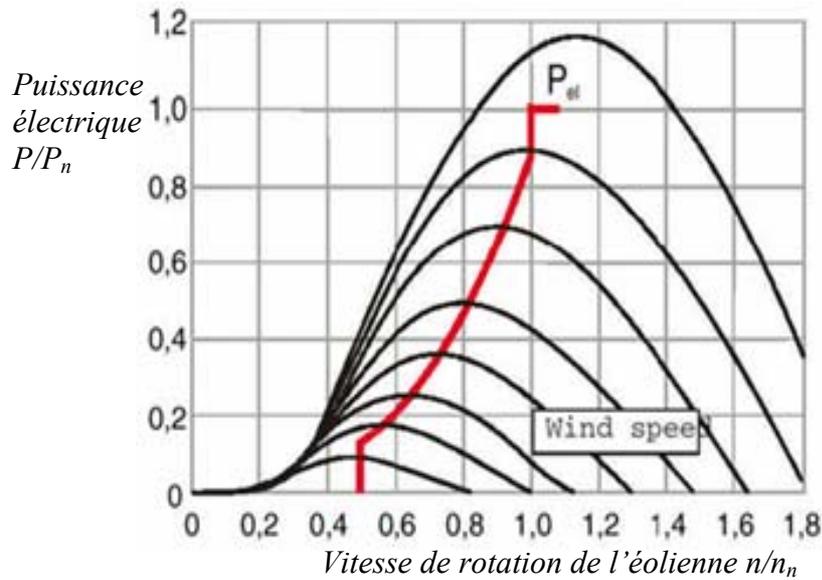


Figure 1.7 : Puissance de la turbine en fonction de sa vitesse de rotation, paramétrée en vitesse du Vent. La position des maxima est tracée. [10].

1.4 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités [10] [11].

1.4.1 Générateurs asynchrones à cage

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Bien que la première machine qui vient à l'esprit pour de tels systèmes soit la génératrice synchrone, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt [11].

Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive (Fig. 1.8) et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances

permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau.

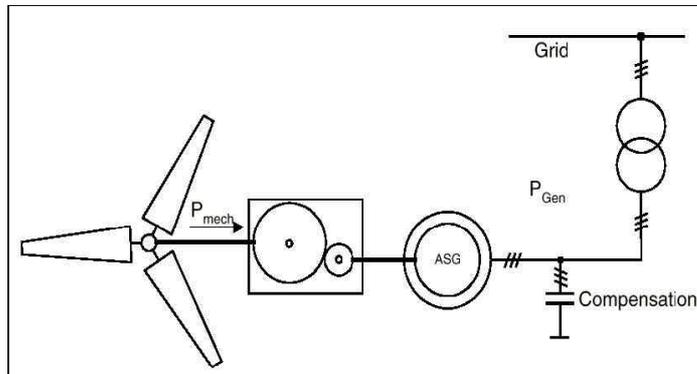


Figure 1.8 : Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage [11].

Nous avons vu précédemment l'intérêt de la variation de vitesse. Une solution couramment employée consiste à utiliser des machines asynchrones à cage à 2 configurations polaires du bobinage statorique qui procurent ainsi deux vitesses de synchronisme [10].

1.4.2 Génératrices asynchrones à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné et à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit [11].

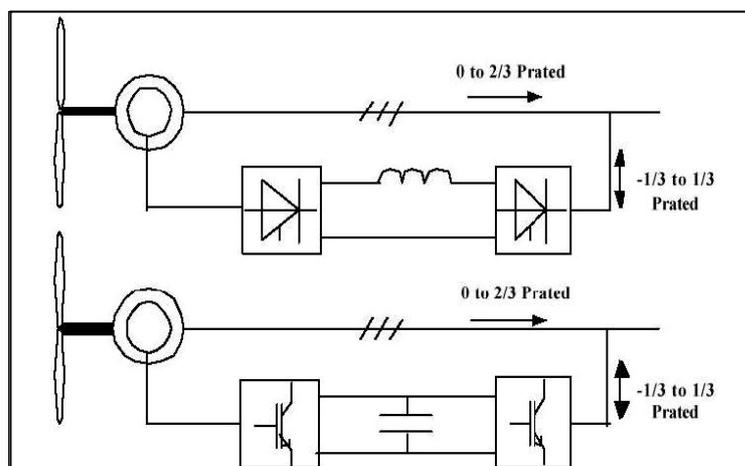


Figure 1.9 : Chaînes de conversion à génératrice asynchrone à rotor bobiné [11].

La figure 1.9 montre deux systèmes à double alimentation. Le premier est à convertisseurs à thyristors. Il n'est plus utilisé car il présente trop d'inconvénients en termes de facteur de puissance et de formes d'ondes (côté machine et côté réseau). Actuellement, ce sont les systèmes à deux convertisseurs triphasés à modulation de largeur d'impulsion qui sont utilisés (second système), généralement à IGBT.

Les machines à rotor bobiné (double alimentation) nécessitent un rotor sensiblement plus complexe ainsi qu'un système triphasé de bagues et balais pour connecter les enroulements rotoriques au convertisseur.

Les problèmes d'usure et de maintenance associée pourraient conduire à préférer une solution à vitesse variable constituée d'une génératrice asynchrone à cage associée à un convertisseur de fréquence figure 1.10, mais il ne semble pas qu'elle ait encore trouvé un débouché, sans doute pour des raisons économiques [11].

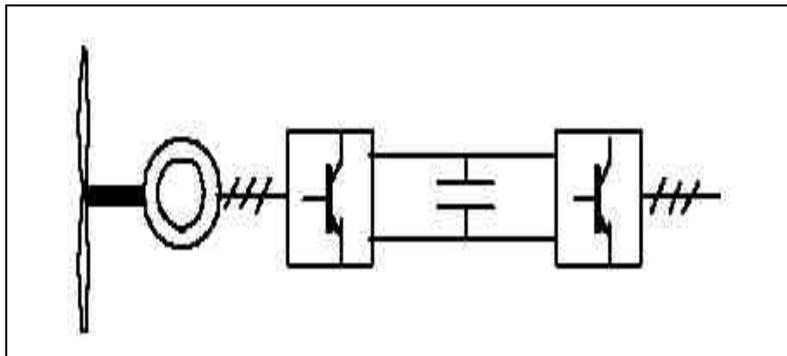


Figure 1.10 : Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage [11].

1.4.3 Génératrices synchrones

Enfin, tout particulièrement dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des machines synchrones. Leurs performances, notamment en terme de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles, leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable [11].

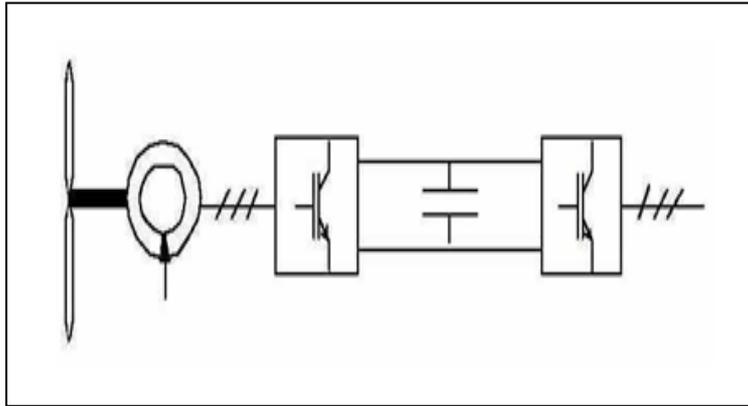


Figure 1.11 : Chaîne de conversion à génératrice synchrone à rotor bobiné (ou à aimants) et convertisseur de fréquence [11].

Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses, le principal fabricant est *Enercon* (plusieurs milliers de machines sont déjà en service, 300 KW, 600 KW, 1 MW et 1,8 MW). L'inducteur (rotor) est bobiné, il nécessite un système bagues lisses-balais ou un système à diodes tournantes sans contact (comme dans les « alternateurs classiques » de production) pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI.

On trouve également des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, comme chez le constructeur *Made* (gamme au-delà de 800 KW). Ces machines fonctionnent à vitesse variable, elles débitent sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel elles sont connectées [11] [12].

1.5 Systèmes en site isolé

Pour les réseaux de petites puissances en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et est auto amorcée par condensateurs. Pour éviter des démarrages trop fréquents du groupe électrogène, ou pour assurer les transitions, des batteries électrochimiques, voire des accumulateurs inertiels, peuvent également être associées via un convertisseur électronique. Une autre solution couramment employée consiste à utiliser un bus continu intermédiaire avant de

transformer l'énergie en courant alternatif. Dans le cas des très petites puissances, l'énergie est directement consommée en courant continu.

Le bus continu présente l'avantage d'interconnecter plus aisément divers systèmes de production (éolien, photovoltaïque, pile à combustible...) et des batteries électrochimiques qui peuvent se trouver directement en tampon sur de tels bus.

La figure 1.12 montre une solution de plus en plus employée pour associer un aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et les packs de batteries.

Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à l'inductance d'induit de la machine synchrone de forte valeur que les courants restent proches des formes sinusoïdales et que les rendements de conversion sont corrects. En cas de surcharge de la batterie (trop de tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation [11] [12].

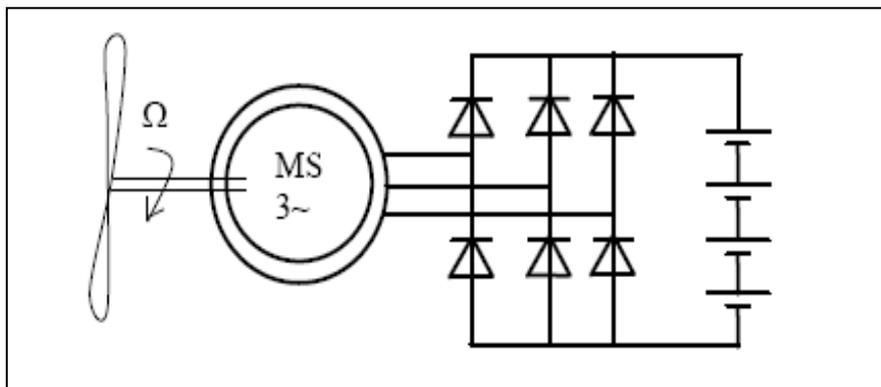


Figure 1.12 : Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu [12].

1.5.1 Les caractéristiques de petites éoliennes

Le « petit éolien » couvre la gamme des puissances de 20W à 100kW réparties en trois catégories : micro-éoliennes de 20W à 500W, mini-éoliennes de 500W à 1kW et petites éoliennes de 1 à 100kW. Au delà les projets s'apparentent au grand éolien. La catégorie du petit éolien de 1 à 100kW doit principalement son développement au marché des régimes insulaires généralement dans des applications hybrides éolien/diesel. L'intégration de l'éolien

au bâti, peut aussi avoir un certain intérêt malgré des obstacles non négligeables à surmonter (forte instationnarité du gisement due à la rugosité des sites, contraintes d'environnement et de sécurité,... L'emploi du petit éolien pour l'électrification rurale décentralisée, est peu répandu et a très souvent été un échec en raison de l'absence d'organisation humaine en charge de la maintenance et de l'exploitation des systèmes. Les génératrices sont quasi exclusivement à aimants permanents. La plupart sont synchrones triphasées mais quelques unes d'entre elles sont encore à courant continu. En comparaison des chiffres habituels dans le « grand éolien », la gamme de vitesse de rotation est ici plutôt élevée (jusqu'à 2000 T/min), ce qui est un avantage pour le dimensionnement de la génératrice qui « redevient classique », mais un inconvénient certain au plan acoustique. Ceci est du au fait que, pour un profil de pale donné, la gamme de vitesse augmente quand le rayon des pales diminue, ce qui explique que les pales des très grosses turbines tournent à quelques tours par minute. On peut cependant noter que certaines de ces génératrices tournent plus lentement (jusqu'à 175 T/min pour la plus grosse turbine de 20kW). Comme illustré au paragraphe 1.3.2, une solution pour diminuer la vitesse de rotation et limiter le bruit consiste à choisir des éoliennes à axe vertical, de type *Savonius* par exemple puisque ces turbines tournent en moyenne 6 à 8 fois moins vite qu'une tripale classique, ceci pour un rayon identique [12].

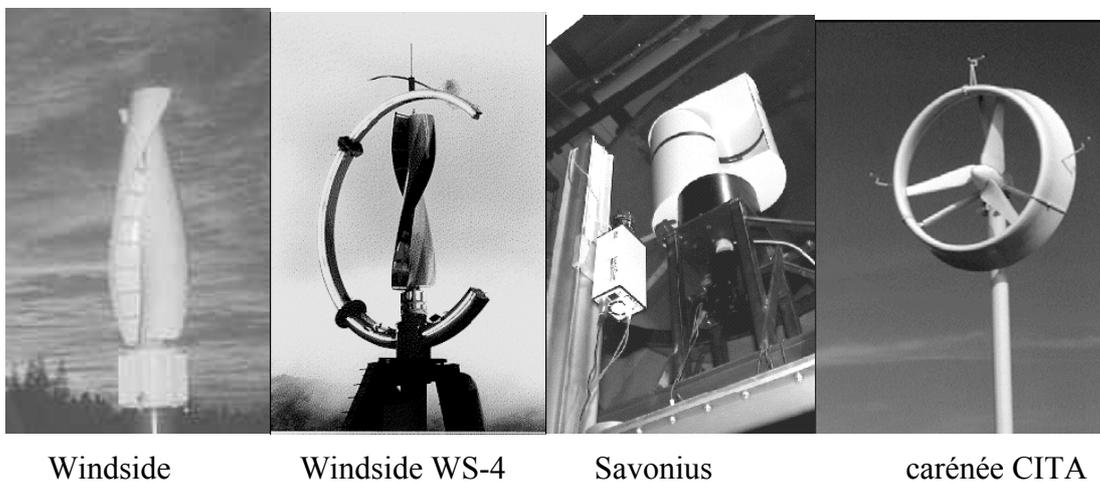


Figure 1.13 : différents types des aérogénérateurs de petite puissance [11] [12].

1.5.2 Optimisation de la forme de voileure d'une Savonius

Le rotor de *Savonius* est une éolienne à axe vertical composée de deux aubes semi cylindriques décalées par rapport à l'axe de rotation. Cette machine a fait l'objet de nombreuses études, essentiellement de nature expérimentale. La figure 1.4 présente un panorama récapitulatif de l'évolution du coefficient de puissance des différents types d'éoliennes en fonction du coefficient de vitesse périphérique. Il apparaît que le rotor de Savonius est tout à la fois l'éolienne la moins performante et la machine la plus lente. Ces deux aspects semblent, pris séparément, constituer des inconvénients.

En fait, cette association conduit à envisager cette machine comme un rotor à couple ; c'est effectivement cette caractéristique qui sera mise en évidence dans la suite de l'étude. Les caractéristiques de régime lent associé en à un bon couple au démarrage et en fonctionnement permettent d'envisager cette machine plutôt comme une éolienne de pompage.

Le calcul des coefficients de moment et de puissance a été réalisé à partir de la détermination expérimentale en soufflerie aérodynamique du champ des pressions statiques d'aubes (intrados et extrados). La figure 1.14 montre la disposition des capteurs de pression. Des études sur la voileure d'une *Savonius* ont permis de définir des critères d'optimisation. Dans cette optique, trois types de voileure ont été étudiés [13] :

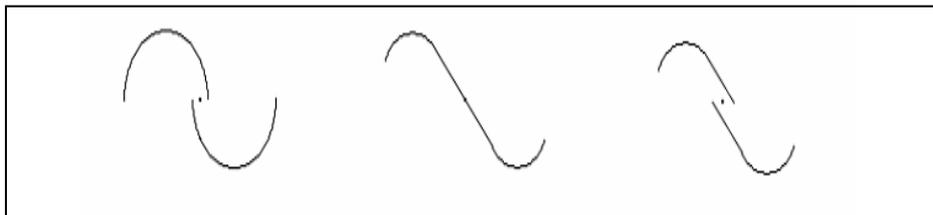


Figure 1.14 : Optimisation de la configuration de la turbine Savonius [13].

A la suite de l'étude, la dernière forme, représentée sur la droite a montré les meilleures performances. Le gain de performance est de l'ordre de 10% en valeur absolue, soit un C_p qui passe de 0.15 à 0.25 [13].

1.6 Dispositifs de stockage de l'énergie

Dans le cas d'une unité de production non raccordée au réseau la présence d'un dispositif de stockage s'impose dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées. Dans les applications existantes, ce sont quasi-systématiquement des batteries d'accumulateurs au plomb. Le dimensionnement du système de stockage est généralement et simplement lié à l'autonomie en jours recherchée. Ainsi la capacité de stockage correspond.

Une batterie d'accumulateurs est un générateur électrique qui utilise généralement les propriétés électrochimiques d'un couple oxydant-réducteur. Pour un système raccordé au réseau, un dispositif de stockage ne semble nécessaire qu'en cas de défaillance du réseau. Dans ce cas, il est dimensionné de manière à assurer un fonctionnement, éventuellement en mode dégradé, pour la durée de la coupure. Cependant si ces unités de productions, qui ont un caractère aléatoire de par la nature des sources utilisées, viennent à se multiplier et à atteindre des proportions non négligeables alors les dispositifs de stockage joueront un rôle important pour assurer la stabilité du réseau.

Le système de stockage est dimensionné, comme on l'a vu précédemment, par sa capacité de stockage, mais pas seulement. Il doit en effet également répondre aux critères suivants : puissance crête déterminée, bon rendement en charge et en décharge dans la gamme de puissance, pertes d'autodécharges faibles, coûts réduits [14].

1.7 Conclusion

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, les génératrices utilisées, etc. Nos travaux portent sur un système éolien de petite puissance dédié à un site perturbé comme le milieu urbain, des exemples de réalisations pratiques et industrielles de cette catégorie sont proposés. La turbine à axe vertical de type Savonius qui semble être particulièrement adaptée est alors étudiée du point de vue de son rendement. Le prochain chapitre reprendra les différentes structures étudiée et caractérisées dans le cas statique.

2.1 Introduction

Après avoir présenté les différentes sources énergétiques renouvelables à faible pollution environnementale, et après avoir introduit le principe de la conversion d'énergie éolienne, nous nous attachons dans ce chapitre, à présenter les constituants de la chaîne éolienne de faible puissance dédiée au stockage sur batterie. Les modèles présentés ont pour finalité la simulation comportementale du système complet sur le plan électrique et énergétique. Le système éolien étudié est un système complexe composé de plusieurs sous systèmes appartenant à plusieurs domaines physiques très différents.

2.2 Modélisation de la chaîne éolienne de petite puissance

L'énergie en provenance du vent traverse la voileure qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La voileure est directement accouplée à la génératrice et permet la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. Les composants électriques tels que convertisseurs statiques et éléments de filtrage disposés en aval de la génératrice ont un rôle d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique entre la génératrice et la charge finale. Ce niveau est aussi chargé du pilotage de l'ensemble et d'obtenir le point de fonctionnement à la puissance optimale. La charge, sous la forme d'un pack de batteries, donc d'éléments électrochimiques, est un élément de stockage [10] [11]. L'énergie stockée peut être ensuite distribuée vers un éventuel réseau sur lequel sont raccrochés des consommateurs (*Figure 2.1*).

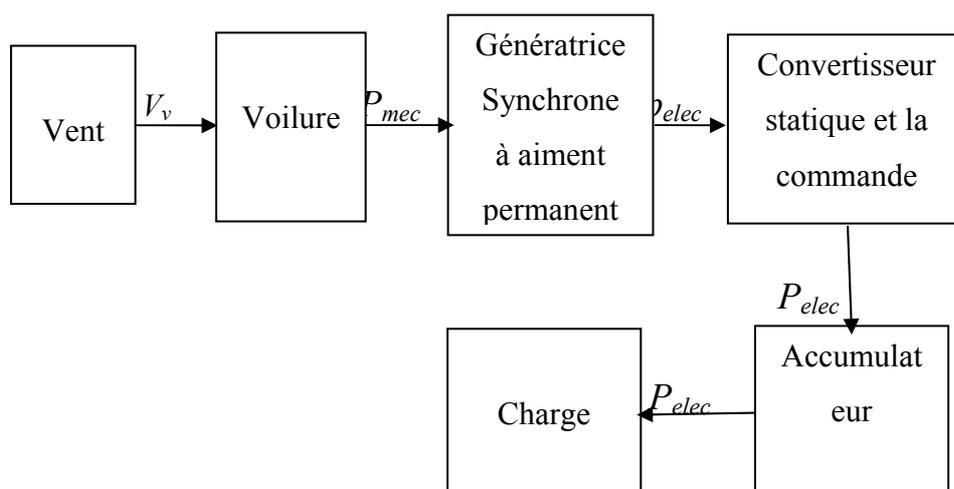


Figure 2.1 : Chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite puissance [12].

2.2.1 Approche simulation

Le niveau de modélisation et le choix de l'outil de simulation revêt une importance capitale. Le logiciel *PSIM* (Power Simulation) répond parfaitement à ce besoin et intègre également une bibliothèque d'éléments hétérogènes (interrupteur, moteur, charge mécanique). De plus, le temps de calcul s'est avéré très satisfaisant utilisant la méthode des nœuds et l'intégration trapézoïdale.

PSIM est un logiciel de simulation pour l'électrotechnique et l'électronique de puissance. Le logiciel permet de dessiner le schéma du montage, à partir des éléments de la bibliothèque (machines, transformateurs, interrupteurs électroniques, éléments de commande et de contrôle...). Les appareils de mesure disposés sur le schéma de montage définissent les courbes représentatives des grandeurs électriques et mécaniques que l'on peut obtenir après simulation [12].

Le logiciel est constitué de 3 programmes :

- SIMCAD: dessin du schéma
- PSIM : simulation (calcul des variables)
- SIMVIEW: tracé des courbes.

Les programmes SIMCAD et SIMVIEW ont fusionné. Les phases de dessin et de calcul sont réalisées par PSIM.

La simulation d'un montage se décompose en étapes :

- dessin du schéma de montage.
- entrée des valeurs des éléments du montage et des paramètres de la simulation.
- visualisation des courbes.

2.2.2 Modélisation de la vitesse du vent

La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Les voilures à axe vertical sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme [12] :

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (2-1)$$

2.2.3 Modélisation de la voilure

Une voilure éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation $\Omega(t)$ et le couple mécanique $C_{mec}(t)$ [12].

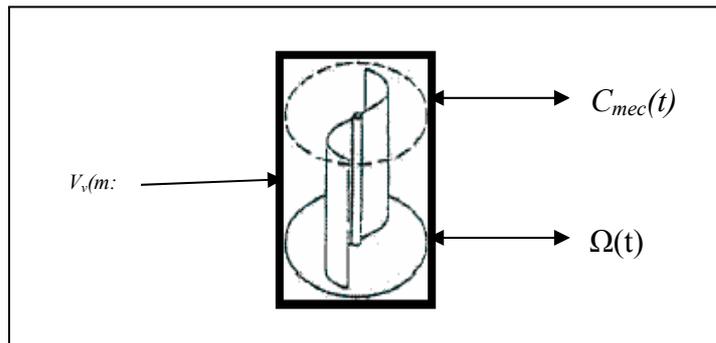


Figure 2.2 : Entrées – sorties du modèle de la voilure Savonius.

Le modèle le plus basique consiste à supposer un fonctionnement quasi-statique en mode générateur de couple éolien C_{eol} :

$$C_{eol} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot V_v^2}{\lambda} \quad (2-2)$$

Où : H et R présentent respectivement la hauteur et le rayon de la turbine (figure 2.4) :

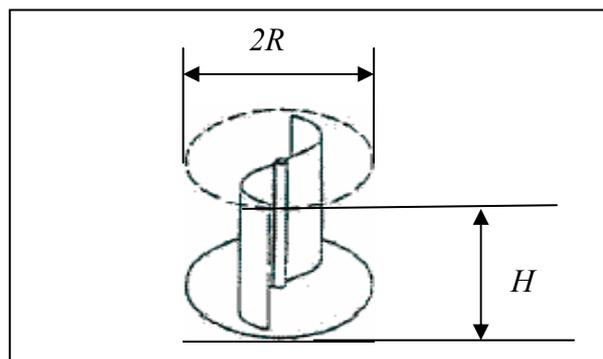


Figure 2.3 : Dimensionnement géométrique de la voilure Savonius.

Le couple éolien n'est pas égal au couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine surtout à cause de l'inertie conséquente de la turbine J et, dans une moindre mesure, des frottements mécaniques f des paliers comme présenté schématiquement sur la Figure 2.4. Il s'avère que l'inertie d'une turbine Savonius est très importante. Il est donc impossible de considérer la turbine vue de l'arbre mécanique comme une source de couple liée directement

à la vitesse du vent et à la courbe caractéristique. Il est plus physique de la considérer comme une source de vitesse. L'équivalence électrique d'un tel système inertiel est montrée sur le schéma de la Figure 2.5 [12].

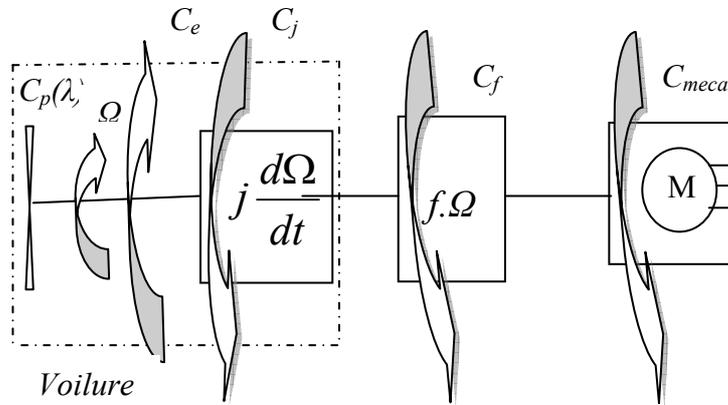


Figure 2.4 : Schéma bloc d'une turbine éolienne [12]

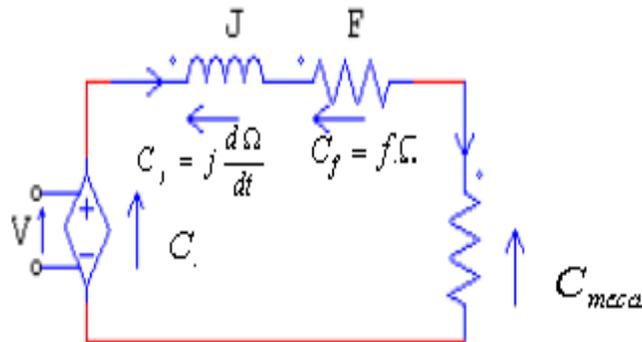


Figure 2.5 : Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne [12].

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

$$\Delta C = C_{eol} - C_{mec} = j \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \tag{2-3}$$

la valeur de la vitesse obtenue :

$$\Omega = \frac{1}{j} \int (\Delta C - C_f) dt \tag{2-4}$$

Où : $C_f = f \cdot \Omega$.

2.2.4 Simulation informatique de la voilure

Le modèle informatique basé sur la description des paragraphes précédents est établi. Les calculs appliqués par le modèle de l'éolienne sont donnés par le schéma de la Figure 2-7. On remarque que la caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure est représentée par un polynôme de troisième degré sous la forme [12] [13]:

$$C_p(\lambda) = a.\lambda^3 + b.\lambda^2 + c.\lambda + d \quad (2-5)$$

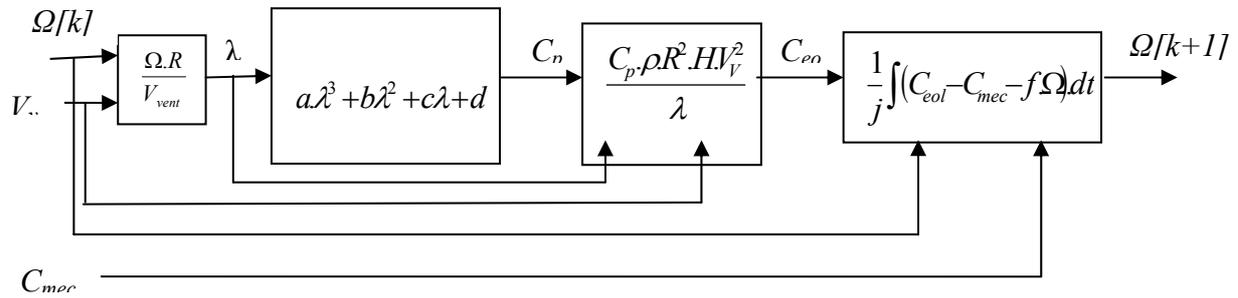


Figure 2.6 : Calculs du modèle de la turbine [12].

L'équation (2-5) de la courbe caractéristique de la voilure est le résultat de l'interpolation des points en provenance des mesures sur les différentes voilures ou des points présentés dans divers documents de référence. Cette façon de représenter une courbe caractéristique d'une voilure dans la plage de fonctionnement de l'éolienne ($0 < \lambda < \lambda_{max}$) est simple et suffisamment précise [12].

La courbe caractéristique de la voilure utilisée pour l'étude du système éolien est présentée sur la Figure 2.7.

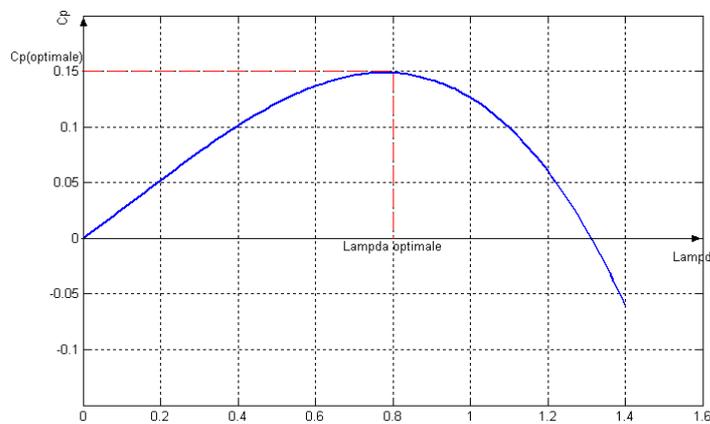


Figure 2.7 : Courbe caractéristique $C_p(\lambda)$.

L'équation algébrique de cette courbe ainsi que ses points remarquables, respectivement vitesse réduite optimale (λ_{opt}), coefficient de puissance maximal C_p et la valeur de la vitesse réduite λ_o pour laquelle la courbe coupe l'axe des ordonnées sont données par :

$$C_p(\lambda) = -0,2121\lambda^3 + 0,0856\lambda^2 + 0,2529\lambda \quad (2-6)$$

Où : $\lambda_{opt} = 0,78$, $C_p^{opt}(\lambda_{opt}) = 0,15$, $\lambda_o = 1,31$

Les dimensions géométriques de cette voilure, respectivement la hauteur et le rayon (*Figure 2.4*), sont : $H = 2m$; $R = 0,5m$.

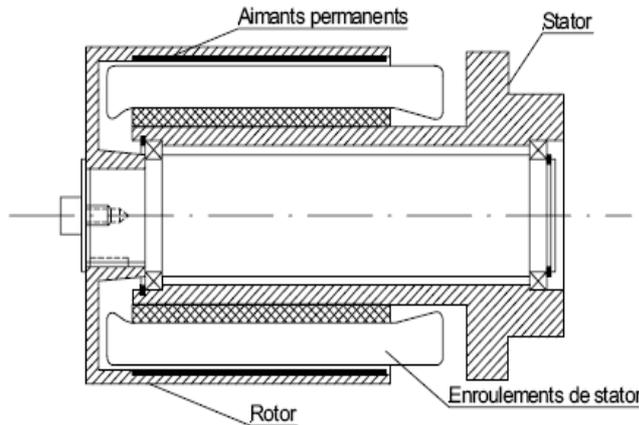
Pour la vitesse réduite optimale, le coefficient de puissance est maximal et la voilure délivre un maximum de puissance mécanique. Il est donc fortement souhaitable d'exploiter le système éolien de façon à obtenir son fonctionnement sur ce point. Les méthodes qui le permettent sont présentées dans le Chapitre 3.

2.3 Machine synchrone à aimants permanents

Les machines utilisées dans ces systèmes sont de construction spécifique, bien adaptées aux besoins particuliers de ce domaine. A chaque type de voilure, correspond une conception de la machine électrique. Elle dépend aussi de l'électronique de puissance en aval ainsi que du mode de pilotage de l'ensemble. Ces contraintes portent aussi bien sur la conception mécanique qu'électrique de la génératrice.

2.3.1 Caractéristiques de la machine WR-02

Dans le cadre de notre étude, nous disposons aussi d'une machine spécialement conçue pour être employée dans un ensemble éolien à axe vertical de type Savonius. Il s'agit d'une machine synchrone WR-02 présentée sur le schéma de la *Figure 2.8*. Cette machine multipôle est à aimants permanents et à rotor extérieur. Compte tenu de la gamme de vitesse de rotation de l'éolienne, le nombre élevé de pôles sert à obtenir une fréquence électrique suffisante sans avoir recours au multiplicateur mécanique, ce qui permet de réduire les pertes mécaniques et d'augmenter la durée de vie du système. La génératrice est conçue pour un fonctionnement vertical ayant un rôle de support de la voilure ; elle est équipée d'un jeu de roulements internes adaptés. Le mât supportant l'ensemble machine –voilure sert aussi de dissipateur de chaleur en provenance du stator bobiné [12] [14].



- Nombre de paires de pôles : $p = 17$
- Tension nominale : $U_n = 90V$
- Courant nominal : $I_n = 4,8A$
- Puissance nominale : $P_n = 600W$

Figure 2.8 : Construction mécanique de la génératrice WR-02 [12].

Les valeurs caractéristiques de la machine WR-02 sont données : $R_s = 1.137\Omega$ (résistances des enroulements), $\Phi_{eff} = 0.14wb$ (flux efficace des aimants), $L_s = 2.7mH$ (inductance synchrone), $J_m = 0.1kg.m^2$ (inertie de la machine), $f_m = 0.06N.m.s/rad$ (coefficient de frottements).

2.3.2 Modèle de la machine sous PSIM

Le modèle suppose par hypothèse qu'on dispose d'armatures à pôles lisses (sans pièce polaire), qu'il n'y a pas de saturation et que la constitution des bobinages est parfaitement symétrique. Les équations de la machine synchrone à aimants permanents utilisées sont [15] [16] :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

Où V_i , i_i , Φ_i sont respectivement les tensions, les courants et les flux magnétiques des phases du stator de la machine, R_s étant la résistance des enroulements. Les couplages sont définis comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \Phi_{pm} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Où : θ_r est l'angle électrique et Φ_{pm} est le flux de l'aimant vu du stator.

2.4 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont un élément essentiel du système de conversion d'énergie pour l'éolien. Non seulement il permet d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie électrique mais aussi d'optimiser la puissance prélevée. En supposant les pertes négligeables dans tous les montages étudiés [16]

2.4.1 Pont de diodes

Le circuit constitué par un pont de diodes parfait (*Figure 2.9*) dans le cas d'une charge et d'une source idéalisée. Il est chargé d'une source de courant I_{dc} constante. La tension redressée U_{dco} à vide est définie par [15] [16] :

$$U_{dco} = \frac{3}{\pi} \cdot E_{ab}^{\max} \approx 2,34 E_a \quad (2-9)$$

Où E_a est la tension efficace par phase.

La pulsation de la tension redressée (*figure 1.10.b*) est à la fréquence $6f$ et son taux d'ondulation vaut :

$$\frac{\Delta U_{dco}}{U_{dco}} = \frac{U_{dco}^{\max} - U_{dco}^{\min}}{U_{dco}} \quad (2-10)$$

La Figure 2.10.a donne les allures des tensions : E_a, E_b, E_c par rapport au neutre et la figure 2-10.b donne les allures des tensions : $E_{ab}, E_{bc}, E_{ca}, U_{dco}$ d'un circuit redresseur parfait.

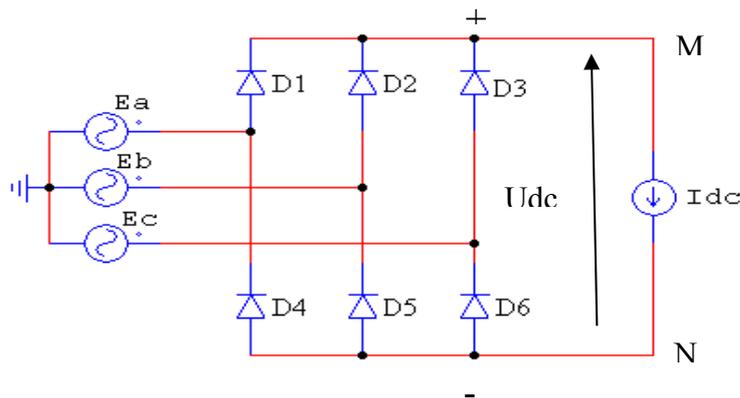


Figure 2.9 : Schéma d'un circuit parfait.

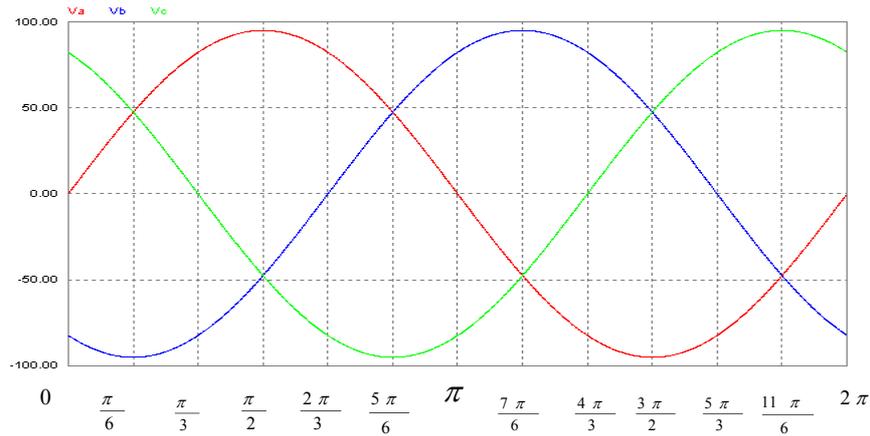


Figure 2.10.a : Tensions simples des phases.

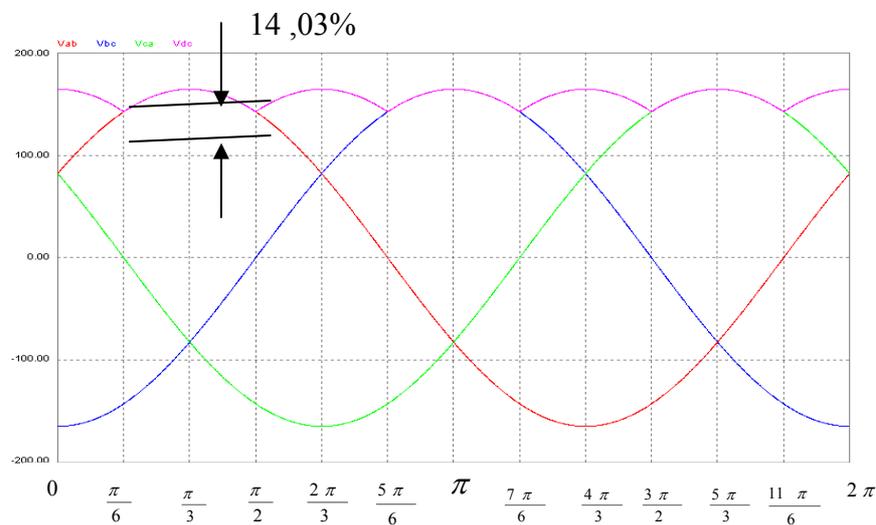


Figure 2.10.b : Tensions simples et angles caractéristiques

Dans les circuits réels, des inductances apparaissent des deux côtés du pont de diodes. La commutation des diodes ne peut plus être instantanée à cause de l'énergie accumulée dans les selfs placées côté alternatif : $di/dt \neq \infty$ [16] [17].

2.4.2 Hacheur dévolteur

Une des structures étudiée est basée sur l'association : éolienne, machine synchrone, pont redresseur à diodes, hacheur dévolteur et batterie, comme montré sur la Figure 2.11. Dans ce paragraphe, l'attention sera portée à la commande du hacheur [17].

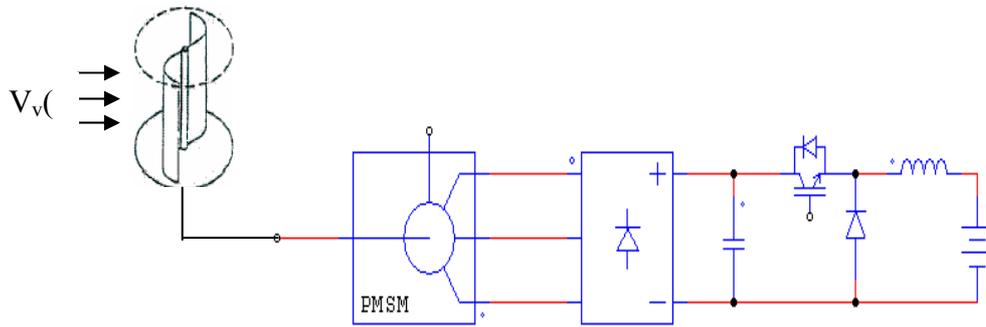


Figure 2.11 : Structure avec pont de diode et hacheur dévolteur.

Le circuit à réguler est donc composé d'une maille comportant une source de tension E_{bat} et une résistance interne à la batterie R_{bat} , placées en série avec une inductance de lissage du courant L_{ch} . La grandeur à contrôler est le courant dans la batterie [18]. L'inductance de lissage est dimensionnée à l'aide de l'expression de l'ondulation du courant tolérée dans la batterie ΔI_{bat} :

$$L_{ch} = \frac{(1-\alpha)}{\Delta I_{bat}^{max} \cdot f_{dec}} \cdot E_{bat} \quad (2-11)$$

Les équations du processus peuvent être aussi écrites au sens des valeurs moyennes sur une période de commutation du hacheur :

$$U_{D0} = \alpha \cdot U_{dc} \quad (2-12)$$

$$u_{D0} = u_{bat} + u_{Lch} \quad (2-13)$$

$$u_{D0} = E_{bat} + R_{bat} \cdot I_{bat} + L_{ch} \cdot \frac{di_{bat}}{dt} \quad (2-14)$$

$$U_{Lch}(t) = L_{ch} \cdot \frac{dI_{bat}}{dt} \quad (2-15)$$

$$I_{bat}(p) = \frac{1}{L_{ch} \cdot p} \cdot U_{Lch} \quad (2-16)$$

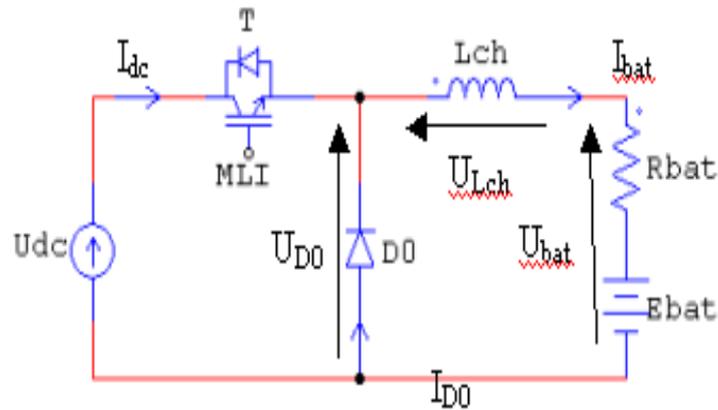


Figure 2.12 : Circuit hacheur à réguler.

A partir de ces équations, le schéma du processus est construit et donné sur la Figure 2.13 dans lequel la tension batterie, vue comme une perturbation de boucle, est compensée à la sortie du régulateur.

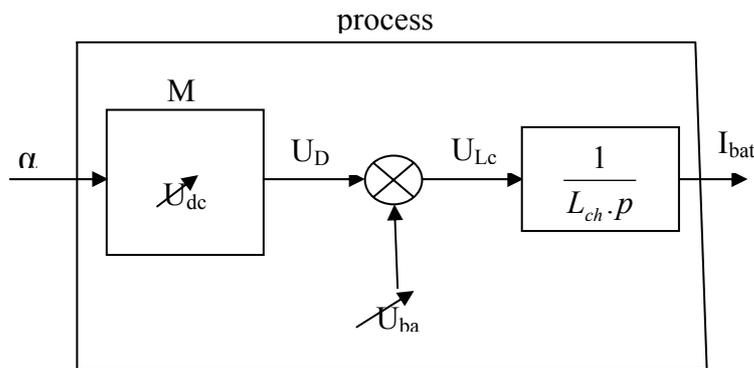


Figure 2.13 : Schéma du processus à réguler [12].

La grandeur régulée, le courant de batterie I_{bat} , dépend de la puissance. C'est la puissance P_{bat} de la batterie qui sert de variable de référence, donc une opération de plus est effectuée où la tension batterie U_{bat} est mesurée [18] [19]:

$$I_{bat}^{ref} = \frac{P_{bat}^{ref}}{U_{bat}} \quad (2-17)$$

L'interrupteur IGBT est commandé par un signal à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). La valeur de rapport cyclique α est donc comparée à une porteuse triangulaire à 5KHz. Le circuit de régulation de la puissance batterie est ainsi prêt à être intégré dans le circuit, le hacheur étant alors alimenté par une tension U_{dc} qui peut être variable. Le bon fonctionnement du régulateur est vérifié sur la Figure 2.14 pour des conditions de simulation déterministe.

Ce paramétrage correspond à un fonctionnement nominal du système éolien présenté dans ce mémoire et la dynamique de la puissance de référence probable basée sur une vitesse du vent de l'échantillon de teste.

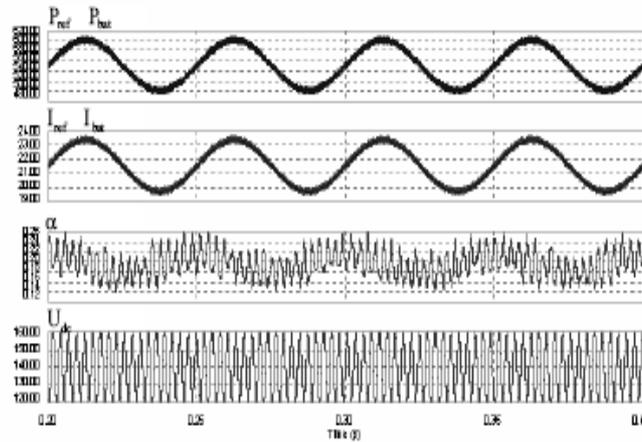


Figure 2.14: Fonctionnement du régulateur de puissance batterie [12].

2.4.3 Hacheur en pont à commande différentielle

En raison du fort rapport de tension entre la tension batterie et la tension du bus, le rapport cyclique de travail est proche de sa valeur de butée basse et un fonctionnement dégradé dû à la mise en butée peut apparaître en régime transitoire. Pour éviter ce problème, la structure en pont à commande différentielle qui sera présentée dans la suite permet de ramener ce rapport cyclique de travail proche de 0,5.

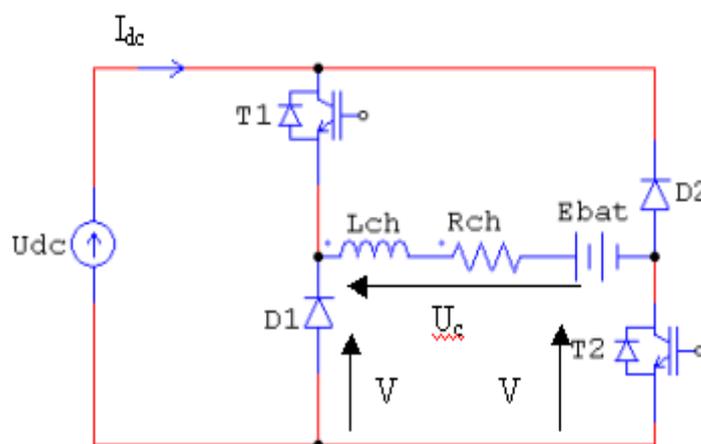


Figure 2.15 : Schéma de convertisseur en pont à commande différentielle.

La stratégie de pilotage dite « différentielle » de ce circuit consiste à commander les interrupteurs T_1 et T_2 de façon à ce que les rapports cycliques des deux transistors évoluent autour de $\alpha = 0,5$ décalés d'une grandeur $\pm\Delta\alpha/2$. Ils suivent la loi décrite par les expressions :

$$V_1 = U_{dc} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\Delta\alpha}{2} \right) \quad (2-18)$$

$$V_2 = U_{dc} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) \quad (2-19)$$

Le but de cette commande est d'obtenir une tension de charge U_{ch} aux bornes de la charge égale à la différence entre les tensions V_1 et V_2 selon le graphique de la (Figure 2.16) donné ci-dessous.

$$U_{ch} = V_1 - V_2 = U_{dc} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\Delta\alpha}{2} \right) - U_{dc} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) = U_{dc} \cdot \Delta\alpha \quad (2-20)$$

Ainsi, la tension résultante U_{ch} est d'une fréquence apparente deux fois plus importante que la fréquence de découpage f_{dec} .

Comme cette fréquence est plus élevée, l'inductance de lissage L_{ch} permettant d'obtenir le même résultat de filtrage que pour le hacheur dévolteur simple.

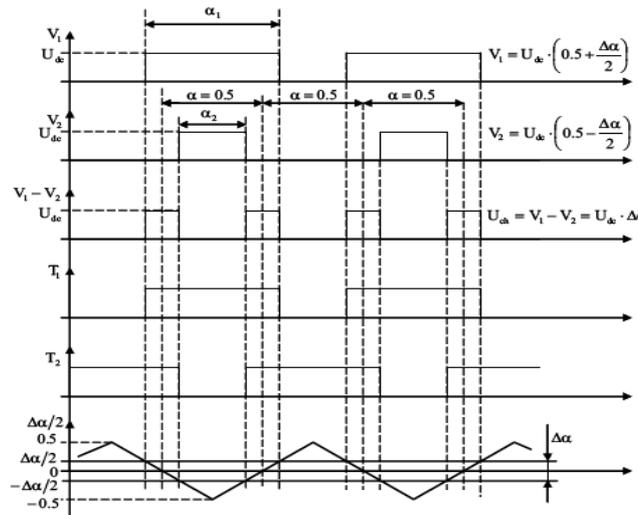


Figure 2.16 : Courbe caractéristiques du hacheur en pont à commande différentielle [12].

Les rapports cycliques α_1 et α_2 pour chacun des interrupteurs sont donc égaux à:

$$\alpha_1 = 0,5 + \frac{\Delta\alpha}{2} \quad (2-21)$$

$$\alpha_2 = 0,5 - \frac{\Delta\alpha}{2}$$

Comme dans le cas du hacheur dévolteur, la régulation doit porter sur la puissance délivrée à la batterie. Ce processus est similaire dans ces deux structures et le pilotage du courant batterie I_{bat} s'impose de façon identique. Les expressions permettant le développement de circuit de commande sont données par :

$$U_{ch} = U_{dc} \cdot \Delta\alpha$$

$$U_{ch} = U_{bat} + U_{Lch} = E_{bat} + R_{bat} \cdot I_{bat} + L_{ch} \cdot \frac{dI_{bat}}{dt} \tag{2-22}$$

Le processus à réguler est donc présenté sur la Figure 2-17 :

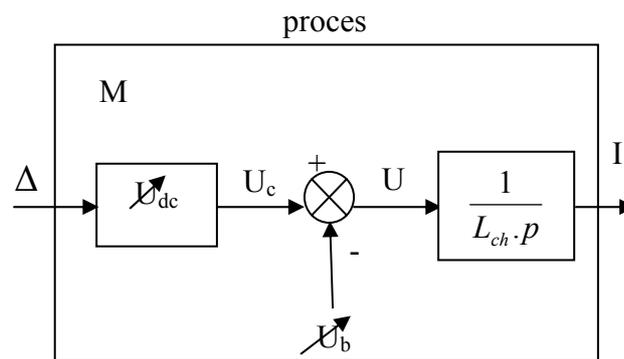


Figure 2.17 : Schéma du processus de contrôle du courant dans un hacheur en pont [12].

On remarque la similitude de ce schéma avec celui du hacheur dévolteur traditionnel. De ce fait, le raisonnement pour la construction des boucles de régulation est identique et on obtient le schéma de la Figure 2.14.

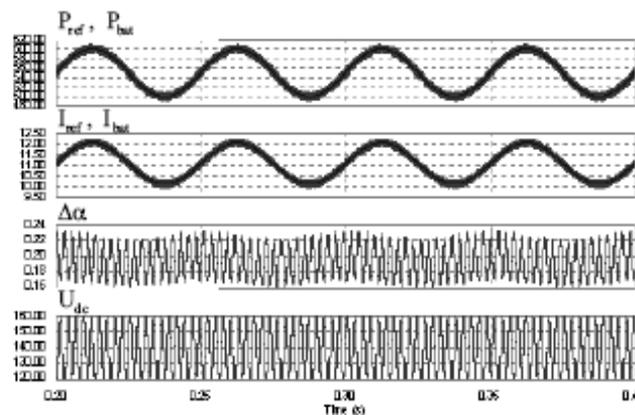


Figure 2.18 : Fonctionnement de la régulation en courant avec commande différentielle d'un hacheur en pont [12].

2.4.4 Redresseur triphasé à contrôle vectoriel par MLI

Parmi tous les convertisseurs AC-DC, la solution de référence est sûrement le redresseur triphasé à modulation de largeur des impulsions (*Figure 2.19*). Il permet un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée. Par un autopilotage de la machine synchrone, il peut contrôler les grandeurs électromécaniques telles que le couple C_{em} ou la vitesse de rotation de la génératrice Ω . Ce montage est survolteur et la tension du bus continu doit être supérieure à la tension composée de la génératrice obtenue à vitesse de rotation (vent) maximale. Nous allons développer cette structure car elle est la plus courante dans les applications éoliennes et donne une indication sur l'efficacité énergétique relative aux autres montages [20] [21].

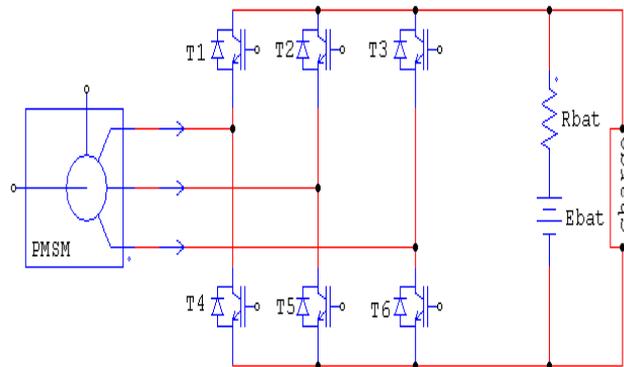


Figure 2.19 : Redresseur MLI.

La vitesse de rotation est liée à la pulsation du champ tournant par la relation :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (2-23)$$

Où p : nombre de paires de pôles de la machine.

Lorsque la machine est chargée, une réaction d'induit apparaît et déplace le flux d'excitation. Le couple électromagnétique et la vitesse de rotation dépendent donc des courants statoriques et du flux magnétique. Les équations différentielles suivantes décrivent la machine synchrone à aimants permanents dans le repère de Park [21]:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_S \cdot I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega\phi_{sq} \\ V_{sq} = R_S \cdot I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega\phi_{sd} \end{cases} \quad (2-24)$$

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_{sd} \cdot I_{sd} + \phi \\ \phi_{sq} = L_{sq} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (2-25)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\phi_{sd} \cdot I_{sq} - \phi_{sq} \cdot I_{sd}) \quad (2-26)$$

En arrangeant les équations on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_S \cdot I_{sd} + L_{sd} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega \cdot L_{sq} \cdot I_{sq} \\ V_{sq} = R_S \cdot I_{sq} + L_{sq} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} - \omega \cdot \phi_{sd} \end{cases} \quad (2-27)$$

On suppose que :

$$\phi = cst \Rightarrow \frac{d\phi}{dt} = 0 \quad (2-28)$$

Et parce que la machine est à pôles lisses alors :

$$L_{sd} = L_{sq} = L_s \quad (2-29)$$

En passant en écriture complexe on a :

$$\overline{V}_s = R_S \cdot i_s + L_s \cdot \frac{di_s}{dt} + j(\omega \cdot \overline{\phi}_s) \quad (2-30)$$

A vide les courants sont nuls :

$$i_{sd} = i_{sq} = i_s = 0 \quad (2-31)$$

Donc :

$$\overline{V}_s = j(\omega \cdot \overline{\phi}_s) \quad (2-32)$$

Et:

$$\phi_{sd} = \phi_s = \phi \quad (2-33)$$

$$\overline{V}_s = \overline{E}_0 = V_{sq} \quad (2-34)$$

Alors :

$$E = \omega \cdot \phi = p \cdot \Omega \cdot \phi \quad (2-35)$$

La constante de temps électrique :

$$T_e = \frac{L_s}{R_S} \quad (2-36)$$

Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné sur la Figure 2.20 (Le schéma est identique pour la boucle de courant dans l'axe q) :

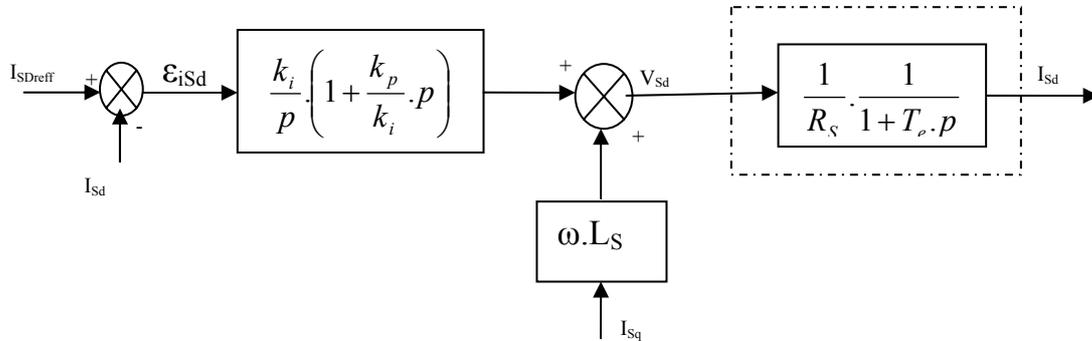


Figure 2.20 : Boucle de régulation de courant [12].

En boucle ouverte la fonction de transfert est égale à :

$$G_0(p) = \frac{k_i}{k_p} \cdot \left(1 + \frac{k_i}{k_p} \cdot p \right) \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e \cdot p} \quad (2-37)$$

Les paramètres du régulateur sont déterminés par la méthode de la compensation du pôle en boucle ouverte. Ainsi, les constantes de temps sont égales à :

$$T_0 = T_a = \frac{k_p}{k_i} \quad (2-38)$$

En boucle fermée la fonction de transfert devient :

$$G_0(p) = \frac{G_0(p)}{1 + G_0(p)} = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{k_i} \cdot p} = \frac{1}{1 + T_f \cdot p} \quad (2-39)$$

En boucle fermée la constante de temps T_f est donc égale à :

$$T_f = \frac{R_s}{k_i} \quad (2-40)$$

D'après l'expression (2-38) le coefficient proportionnel k_p du régulateur est calculé :

$$k_p = \frac{L}{T_f} \quad (2-41)$$

2.5 Batterie

Dans tous les circuits étudiés, une charge de type batterie est considérée. Nous avons admis pour les configurations basse tension (hacheur dévolteur simple, hacheur en pont) que la batterie était composée d'une source de tension parfaite E_{bat} en série avec une résistance interne R_{bat} . La Figure 2.21 donne ce schéma simple mais qui donne le comportement de la batterie en fonction du courant. Cette simplification est malgré tout jugée appropriée aux besoins de cette étude qui ne se focalise pas sur le comportement de la batterie mais sur l'efficacité du système de production d'énergie.

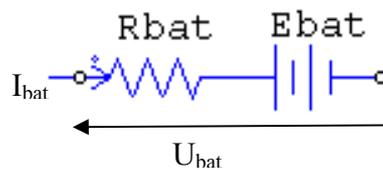


Figure 2.21 : Schéma de simulation de la batterie.

$$U_{bat} = E_{bat} + R_{bat} \cdot I_{bat} \quad (2-42)$$

La valeur de la résistance interne de la batterie est calculée en fonction de sa tension nominale dans les applications où le bus continu demande une tension élevée la batterie est simulée comme une simple source de tension [22] [23].

2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis d'édifier les fondations de notre étude à travers la représentation de l'ensemble des éléments de la chaîne éolienne représentée selon différentes structures de conversion d'énergie. Ainsi, nous avons été amenés à caractériser certains constituants tels que la voilure (courbe $C_p(\lambda)$), les paramètres d'un génératrice à aimant permanent (WR-02) et les notions fondamentale sur la fonctionnement des certaines convertisseurs statiques (pont des diodes triphasé, hacheur dévolteur et différentielle, redresseur MLI), sont utilisé dans notre étude sans compte en considère les pertes générés par ce chaîne de conversion (mode statique). Le prochain chapitre reprendra les différentes structures modélisées et caractérisées ici dans le cas statique, ce qui permettra de conclure sur la recherche de la meilleure solution.

3 Introduction

La génératrice triphasée présentée dans le chapitre précédent est connectée électriquement à un convertisseur statique. Ce convertisseur peut avoir une structure qui dépend des stratégies de recherche du point maximal de puissance. Deux familles de chaînes de conversion dans ce chapitre pour réaliser cette fonction :

- A partir de la structure de redressement MLI à six interrupteurs, il est possible d'autopiloté la machine électrique.
- Un contrôle indirect de la puissance éolienne est possible par l'utilisation d'une chaîne de conversion plus simple et moins coûteuse, à base de pont de diodes triphasé et d'un hacheur dévolteur classique ou d'un hacheur « asymétrique » en aval. Ces structures sont étudiées en considérant que la caractéristique de voilure $C_p(\lambda)$ est connue.

On suppose pour toute structure étudiée que la charge est une source de tension de type batterie possédant à ses bornes une tension bien définie, établie selon le cas étudié [12].

3.1 Les courbes caractéristiques de la voilure Savonius dans le plan puissance – vitesse

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche » (*Figure 2.7*). Pour chaque vitesse de vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale qui correspond aussi à un couple de charge strictement défini. Le schéma de la Figure 3.1 donne les courbes caractéristiques de la voilure éolienne de type Savonius dans le plan puissance - vitesse de rotation de la voilure. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse du vent V_v donnée. Cette famille des courbes est obtenue directement à partir de la caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale de forme cubique, définie par l'équation (3-1). Idéalement, cette courbe doit être suivie à tout moment de fonctionnement de système éolien. Pour s'approcher de ce but une commande spécifique doit être utilisée. Pour cela, il y a deux approches possibles [12] :

- La première, la moins classique, considère que la caractéristique $C_p(\lambda)$ n'est pas connue. Un algorithme de recherche extrême, tel que celui basé sur la logique floue.

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \cdot C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (3-1)$$

- La seconde façon d'agir, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale (Figure 3.1) comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

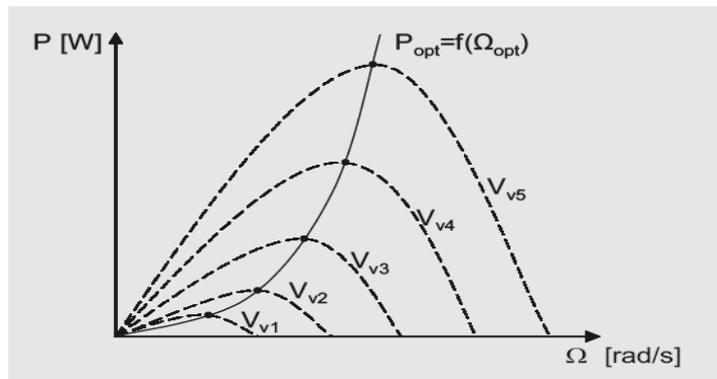


Figure 3.1 : Caractéristiques de voilure dans le plan puissance – vitesse [12].

3.2 Maximisation de puissance sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

Pour l'étude de la commande permettant d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique $C_p(\lambda)$, une structure avec redresseur MLI triphasée, telle que celle de la Figure 2.19, cette structure permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation et ainsi d'effectuer par ce biais une recherche de la puissance maximale souhaitée.

3.2.1 MPPT par la logique floue

En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des règles de comportement à tenir afin de converger vers le point optimal sont relativement simples à établir. Ces règles dépendent des variations de puissance ΔP et de vitesse $\Delta \Omega$. Par exemple : « si je mesure une augmentation de puissance ($\Delta P > 0$) suite à un incrément positif de vitesse, je dois continuer à accélérer la voilure ($\Delta \Omega_{ref} > 0$). On se situe alors sur la partie gauche de la cloche $P(\Omega)$ » [12] [14] [15].

A partir de l'existence de ces règles linguistiques, l'utilisation d'un dispositif MPPT basé sur le principe des ensembles flous est mise en place. Le dispositif MPPT à base de mesure de changement de puissance électrique du bus DC (ΔP) et de vitesse de rotation $\Delta \Omega$ propose un changement $\Delta \Omega_{ref}$ de la consigne de vitesse de rotation de l'éolienne Ω_{ref} selon les équations:

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= P[k] - P[k-1] \\
 \Delta \Omega &= \Omega[k] - \Omega[k-1] \\
 \Delta \Omega_{ref}[k] &= \Omega[k-1] + \Delta \Omega_{ref}[k]
 \end{aligned}
 \tag{3-2}$$

La Figure 3.2 donne un exemple d'une recherche dans le plan puissance – vitesse de rotation, pour une vitesse du vent donnée et constante.

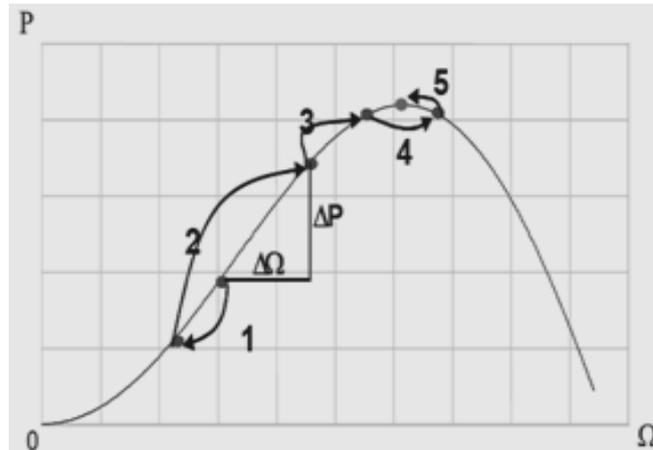


Figure 3.2 : Principe de fonctionnement de MPPT à vitesse de vent constante [12].

Exemple de règles :

$$\text{si } \Delta P > 0 \text{ et } \Delta \Omega > 0 \text{ alors } \Delta \Omega_{ref} > 0$$

$$\text{si } \Delta P < 0 \text{ et } \Delta \Omega > 0 \text{ alors } \Delta \Omega_{ref} < 0$$

Ainsi, le changement de ΔP résultant de la variation de la vitesse de rotation est soit dans le sens positif soit dans le sens négatif. La valeur de ΔP peut aussi être petite où 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 le sens 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 3.3 : on constate que le même type de règles s'applique.

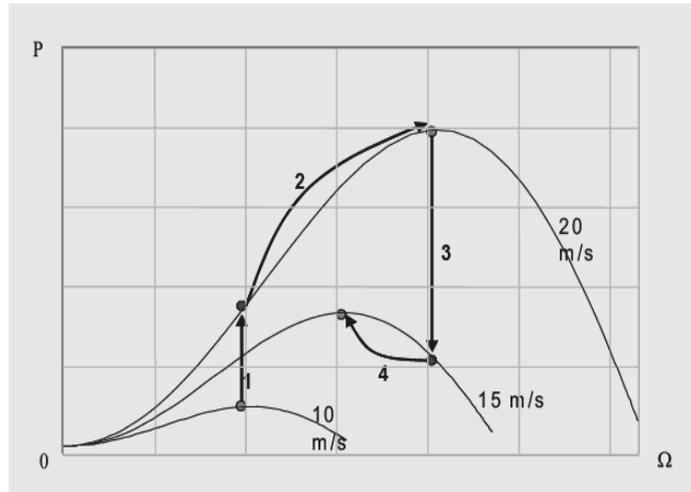


Figure 3.3 : Principe de fonctionnement de MPPT à vitesse de vent non constante

3.2.2 Définition de la logique floue

La logique floue est un processus de raisonnement imitant le comportement intuitif d'un opérateur humain. Elle se base sur les règles de la logique classique sans utiliser de représentations binaires. L'utilisation d'un contrôleur flou n'est envisageable que s'il existe un savoir-faire humain retranscriptible sous formes de règles floues. Les règles floues sont donc inutiles si l'on ne connaît pas parfaitement le fonctionnement du système que l'on veut commander ou si l'on est incapable de le piloter manuellement. Une règle floue comporte trois étapes fonctionnelles résumées par la Figure 3.4 :

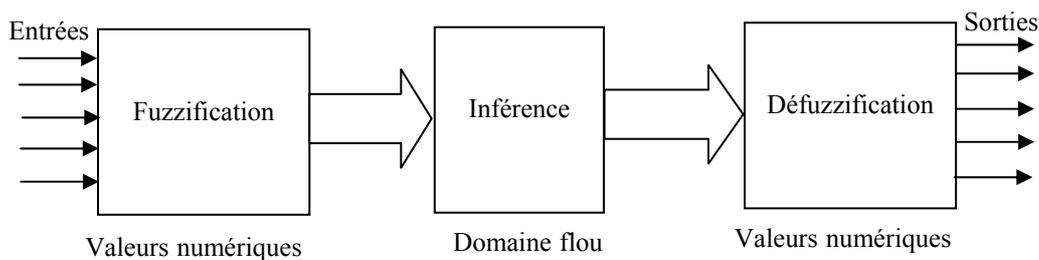


Figure 3.4 : Traitement flou [12].

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. Plusieurs fonctions d'appartenance peuvent être définies sur la même variable : dans le cas de la Figure 3.3, la variable ΔP appartient toujours à deux fonctions d'appartenance. Les fonctions d'appartenances peuvent prendre n'importe quelle forme, dans notre cas elles sont triangulaires, principalement pour des raisons de simplification des

calculs. Pour l'exemple de la (Figure 3.5) les fonctions d'appartenance de la variable ΔP sont : GN : Grand Négatif, MN : Moyen Négatif, PN : Petit Négatif, ZE : Zéro, GP : Grand Positif, MP : Moyen Positif, PP : Petit Positif.

L'opération de fuzzification permet de passer du domaine réel au domaine flou. Elle consiste à déterminer le degré d'appartenance (μ) d'une variable d'entrée pour une fonction d'appartenance donnée (MP et PP dans l'exemple de la (Figure 3.5)). Le degré d'appartenance représente le degré de vérité de la fonction d'appartenance. Dans l'exemple de la (Figure 3.5), la variable d'entrée (ΔP) est égale à 8 (dans le domaine réel) :

- Le degré d'appartenance de la fonction d'appartenance PP est donc de 0.8 ($\mu_{PP} = 0.8$).
- Le degré d'appartenance de la fonction d'appartenance MP est de 0.2 ($\mu_{MP} = 0.2$).

Les degrés d'appartenance des autres fonctions d'appartenance sont nuls. On peut également dire que la proposition « la variation de puissance est petite et positive » est vraie à 80% et que la proposition « la variation de puissance est moyenne et positive » est vraie à 20%. La fuzzification de la seconde variable d'entrée mesurée, $\Delta\Omega(k-1)$, se fait de la même manière.

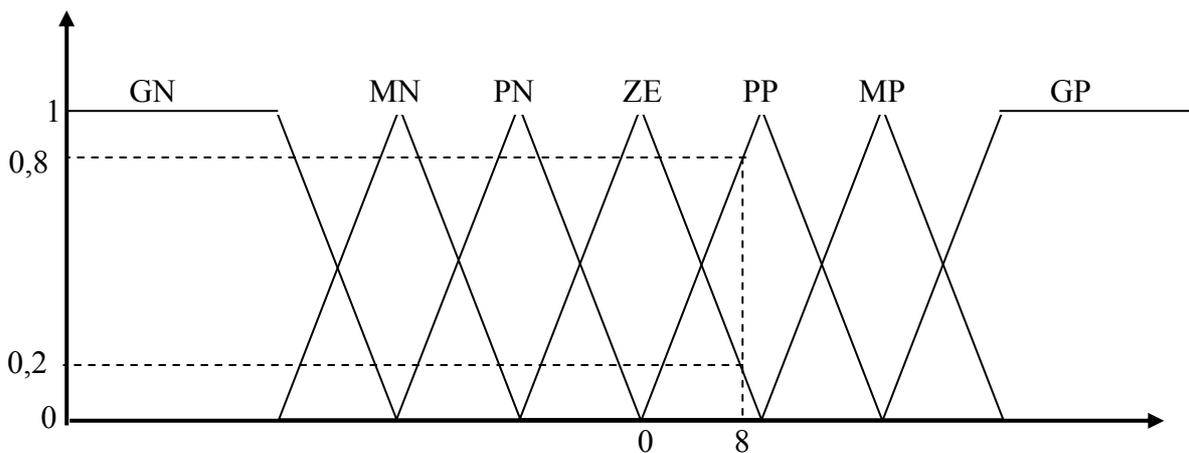


Figure 3.5 : Fuzzification : fonction d'appartenance de l'entrée ΔP .

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 (Tableau 3-1). 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 grande augmentation de la vitesse entraîne une grande augmentation de la puissance, on continue d'augmenter fortement la vitesse de rotation.
- Si une grande augmentation de la vitesse entraîne une grande diminution de la puissance, on diminue fortement la vitesse de rotation pour obtenir une augmentation rapide de la puissance.
- Si une grande augmentation de la vitesse entraîne une faible augmentation de la puissance (on est alors proche de la vitesse de rotation optimale) on augmente moyennement la vitesse de rotation (début de la stabilisation).
- Si une petite diminution de la vitesse entraîne une augmentation moyenne de la puissance (on est alors loin de la vitesse de rotation optimale), on diminue moyennement la vitesse de rotation de telle sorte à se rapprocher plus rapidement du sommet de la cloche.
- 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).
- Si une variation nulle de la vitesse de rotation n'entraîne une augmentation de la puissance, on en déduit que la vitesse du vent a augmenté, il faut donc augmenter la vitesse de rotation pour se rapprocher de la nouvelle vitesse optimale.
- Si une variation nulle de la vitesse de rotation n'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.

Tableau 3-1 : Règles permettant de déterminer les fonctions et les degrés d'appartenance de $\Delta\Omega_{ref}(k)$.

ΔP $\Delta\Omega_{ref}$	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
GN	GP	GP	MP	ZE	MN	GN	GN
MN	GP	MP	PP	ZE	PN	MN	GN
PN	MP	PP	PP	ZE	PN	PN	MN
ZE	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
PP	MN	PN	PN	ZE	PP	PP	MP
MP	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
GP	GN	GN	MN	ZE	MP	GP	GP

Il existe des opérateurs logiques flous *ET* et *OU* qu'on utilise pour l'écriture formelle des opérations sur des ensembles flous. L'opérateur logique correspondant à l'intersection des ensembles flous A et B est le *ET* : $\mu(A \text{ ET } B) = \min(\mu A, \mu B)$.

L'opérateur logique correspondant à l'union des ensembles flous A et B est le *OU*. Comme pour la logique classique : $\mu(A \text{ OU } B) = \max(\mu A, \mu B)$.

Le tableau d'inférence (*Tableau 3-1*) est composé de règles floues, utilisées en parallèles, qui sont toutes du type : Si « condition1 » ET « condition2 » ALORS « conclusion3 ».

Les conditions étant liées entre elles par un opérateur logique *ET*, le degré d'appartenance de la fonction d'appartenance qui est la conclusion seront alors égales au minimum des deux degrés d'appartenance des conditions : $\mu_{\text{conclusion1}} = \min(\mu_{\text{condition1}}, \mu_{\text{condition2}})$.

Les fonctions d'appartenances de sortie sont construites par agrégations des fonctions d'appartenances obtenues par l'ensemble des règles. Par exemple, le degré de la fonction d'appartenance de sortie $\Delta\Omega_{\text{ref}}[k] = \text{GN}$ va être calculé sept fois puisqu'il y a exactement sept règles qui aboutissent à cette conclusion. On considère que toutes les conclusions qui aboutissent à une même fonction d'appartenance (mais qui ont des degrés différents) sont liées entre elle par un *OU* logique. On calcule donc le maximum entre les fonctions d'appartenances résultantes des différentes règles. Par exemple :

- $\mu(\Delta\Omega_{\text{ref}}[k]=\text{GN}) = \max, [\min[\mu(\Delta\Omega[k-1]=\text{GP}); \mu(\Delta\text{P}=\text{GN})];$
- $\min [\mu(\Delta\Omega[k-1]=\text{GP}); \mu(\Delta\text{P}=\text{MN})]; \min[\mu(\Delta\Omega[k-1]=\text{MP});$
- $\mu(\Delta\text{P}=\text{GN})]; \min[\mu(\Delta\Omega[k-1]=\text{GN}) ; \mu(\Delta\text{P}=\text{GP})] ; \min[\mu(\Delta\Omega[k-1]=\text{GN});$
- $\mu(\Delta\text{P}=\text{MP}); \min[\mu(\Delta\Omega[k-1]=\text{MN}); \mu(\Delta\text{P}=\text{GP})] ; \min[\mu(\Delta\Omega[k-1]=\text{ZE}) ; \mu(\Delta\text{P}=\text{GN})]]$.

La troisième phase des calculs est l'opération de défuzzification qui permet de passer du domaine flou au domaine réel. A partir des fonctions d'appartenance représentant notre valeur de sortie ($\Delta\Omega_{\text{ref}}[k] = \text{GN}$, $\Delta\Omega_{\text{ref}}[k] = \text{MN}$, $\Delta\Omega_{\text{ref}}[k] = \text{PN}$, $\Delta\Omega_{\text{ref}}[k] = \text{ZE} \dots$) il faut calculer une valeur numérique pour $\Delta\Omega_{\text{ref}}[k]$. On utilise pour cela la méthode du centre de gravité à partir de fonctions singletons (Figure 3-10). Par exemple pour les fonctions d'appartenance de sortie:

- $\mu(\Delta\Omega_{\text{ref}}[k]=\text{ZE}) = 0,25$; $\mu(\Delta\Omega_{\text{ref}}[k]=\text{PP}) = 0,15$; $\mu(\Delta\Omega_{\text{ref}}[k]=\text{MP}) = 0,65$.
- $\mu(\Delta\Omega_{\text{ref}}[k]=\text{GN}) = \mu(\Delta\Omega_{\text{ref}}[k]=\text{MN}) = \mu(\Delta\Omega_{\text{ref}}[k]=\text{PN}) = \mu(\Delta\Omega_{\text{ref}}[k]=\text{GP}) = 0$.

On trouve :

$$\Delta\Omega_{ref}[k] = \frac{\sum_{i=1}^7 (x_i \cdot \mu_i)}{\sum_{i=1}^7 \mu_i} = 1,81 \tag{3-3}$$

Soit l'abscisse du centre de gravité de la zone hachurée de la (Figure 3.6).

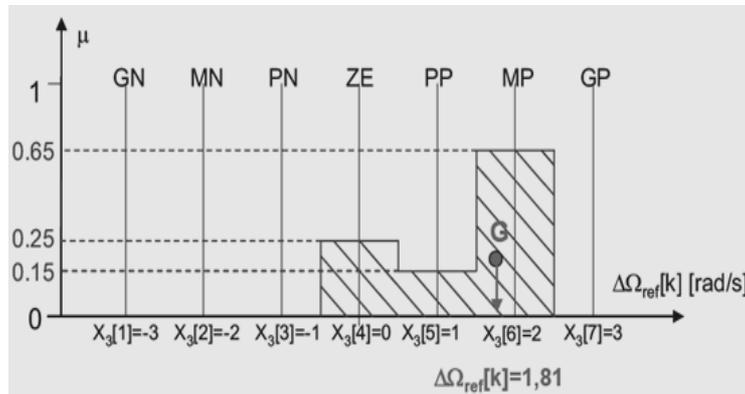


Figure 3.6 : Défuzzification à l'aide de fonctions singleton par la méthode du centre de Gravité.

La réalisation de la commande MPPT consiste à l'implanter dans le code de la simulation de la chaîne de conversion d'énergie et dans les calculs de pilotage de banc d'essai des lignes de commande floue décrites ci-dessus.

3.2.3 Simulations de l'algorithme MPPT à logique floue

Le schéma bloc, intégrant ces divers éléments et formant la structure complète de système éolien, est donné par la Figure 3.7.

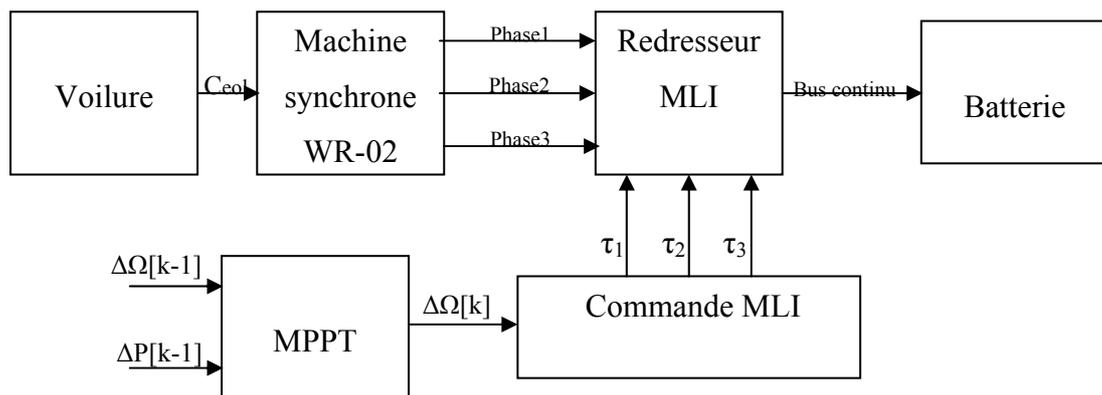


Figure 3.7 : Schéma complet de simulation de système avec MPPT – redresseur MLI.

3.2.4 Mise en évidence des problèmes de Tracking

Il existe des cas de fonctionnement sensibles dans lesquels l'algorithme MPPT flou a du mal à converger rapidement. C'est le cas quand la vitesse de vent augmente constamment ou au contraire que cette vitesse est constamment décroissante. Pendant ces phases de fonctionnement particulier, le dispositif présenté n'est pas capable de distinguer si la cause de la variation de puissance est due à la variation de la vitesse du vent ou au contraire si elle est due à la variation de la vitesse de rotation. On peut parvenir ainsi à une situation extrême où l'algorithme peut progresser dans le mauvais sens comme indiqué sur la Figure 3.8. Ce défaut dépend fortement des réglages du dispositif MPPT par rapport à la dynamique de la vitesse du vent. Cependant, un réglage véritablement robuste quel que soit la turbulence du gisement est très délicat voire impossible à obtenir [12] [16].

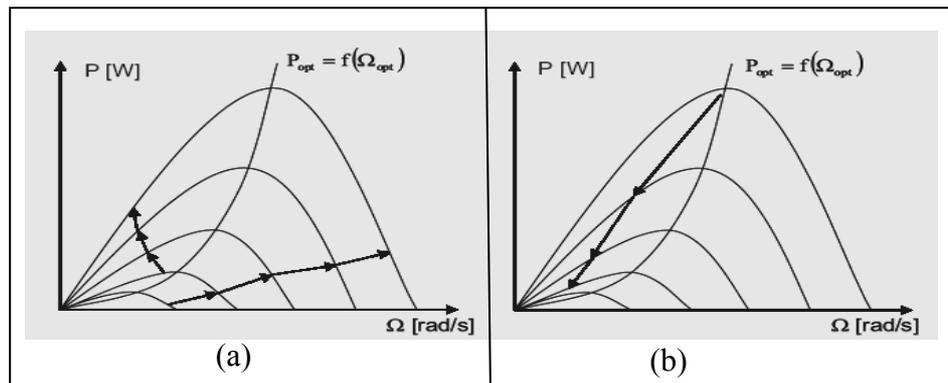


Figure 3.8 : Problème de fonctionnement du MPPT a) augmentation du vent
b) diminution du vent [12].

3.3 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano – électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de la vitesse du vent. Cependant, une telle caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale et d'utiliser les structures des convertisseurs plus basiques et moins coûteuses.

3.3.1 Commande indirecte par le pilotage du courant de charge

Dans ce cas deux structures, basées sur le redresseur à diodes et permettant d'accomplir la recherche du point maximal de puissances (Figure 3.9). Du fait, que le pont de diodes est un élément passif non commandé, l'autopilotage indirecte de la génératrice est donc nécessaire. Pour cela, on interface un convertisseur DC-DC (hacheur), capable de régler le courant de charge. On contrôle ainsi le courant de charge (« côté DC ») qui débite dans une batterie selon le point de fonctionnement de l'éolienne. Contrairement aux cas précédents, le contrôle de la charge mécanique de voileure s'effectue de façon indirecte à travers le pont de diode.

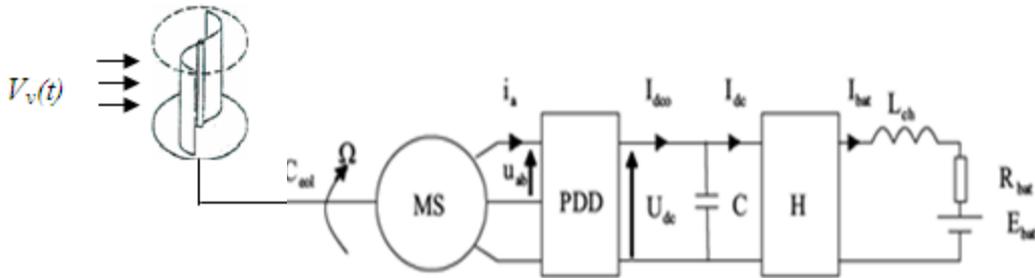


Figure 3.9 : Schéma de circuit à pont de diodes [12]

3.3.1.1 MPPT coté DC

La régulation de I_{bat} est équivalente à la régulation de la puissance batterie qui possède une tension fixe (on néglige ici la résistance interne de la batterie). Le rendement global η peut être pris en compte dans le bilan des puissances :

$$P_{bat} = U_{bat} \cdot I_{bat} \quad (3-4)$$

Le rendement total η est calculé où la puissance éolienne optimale est donnée par :

$$\eta = \frac{P_{bat}^{max}}{P_{eol}^{opt}} \quad (3-5)$$

La puissance éolienne maximale est calculée :

$$P_{eol}^{opt} = k_{opt} \cdot \Omega_{opt}^3 \quad (3-6)$$

Avec :

$$k_{opt} = \frac{C_P^{opt} \cdot R^4 \cdot H}{\lambda_{opt}^3}$$

Alors la puissance maximale injectée dans la batterie peut être assimilée à :

$$P_{bat}^{max} = \eta \cdot k_{opt} \cdot \Omega_{opt}^3 \quad (3-7)$$

Le courant optimal de batterie donné par :

$$I_{bat}^{opt} = \frac{\eta \cdot k_{opt}}{U_{bat}} \cdot \Omega_{opt}^3 = k'_{opt} \cdot \Omega_{opt}^3 \quad (3-8)$$

Le dispositif de recherche de la puissance maximale peut être alors construit pour ce type de circuit (Figure 3.10) en utilisant la mesure de la vitesse de rotation.

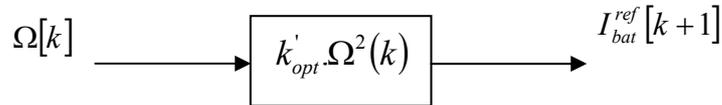


Figure 3.10 : Courant de référence en fonction de la vitesse de rotation

La tension du bus continu U_{dc} est donnée par l'expression suivant :

$$U_{dc}(\Omega) \approx \frac{3}{\pi} \cdot E_{ab}^{max} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot \Phi_{eff} \cdot P \cdot \Omega \quad (3-9)$$

Ainsi, le dispositif MPPT prend la forme de la Figure 3.11 où $f(U_{dc})$ représente la fonction puissance maximale batterie en fonction de la tension de bus continu à déterminer.

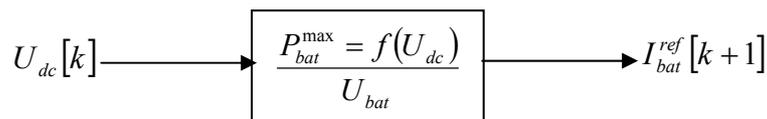


Figure 3.11 : Courant de référence en fonction de la tension bus.

3.3.1.2 Hacheur dévolteur simple

La tension de bus continu étant plutôt élevée par rapport à la tension standard d'une batterie (48V), l'utilisation d'un hacheur abaisseur de tension paraît légitime. Dans ce cas, le système de conversion d'énergie est composé d'un redresseur triphasé à six diodes suivi d'un hacheur dévolteur mono directionnel en courant et tension, commandé indirectement en puissance.

Dans un premier temps, on considère la stratégie de la Figure 3.10 qui suppose la vitesse de rotation connue et mesurée. Les pertes étant supposées négligeable, le rendement global η est constant. La puissance batterie est alors proportionnelle à la puissance éolienne à un coefficient multiplicateur près. Les simulations ainsi obtenues permettent de confirmer la viabilité du principe de fonctionnement du dispositif de recherche de la puissance maximale du point de vue de la puissance éolienne P_{eol} [18].

L'équation (3-10), à la base du dispositif MPPT de la Figure 3.12 en est tirée.

$$P_{bat}^{max}(U_{dc}) = (a \cdot U_{dc} + b)^3 \quad (3-10)$$

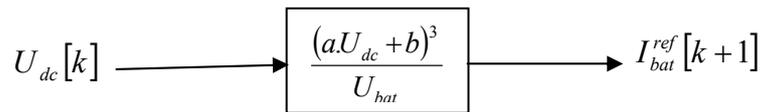


Figure 3.12 : Schéma de pilotage MPPT

Pour apprécier le fonctionnement du dispositif MPPT « côté batterie », il faut une référence pour comparaison de puissance. Pour cela, la construction d'une courbe de régime permanent donnant puissance maximale batterie en fonction de la vitesse du vent semble être une bonne solution.

3.3.1.3 Hacheur en pont à commande différentielle

L'inconvénient majeur du hacheur dévolteur à un bras est lié à la limitation en tension par le rapport cyclique. En particulier, la butée basse du rapport cyclique correspond aux modes de fonctionnement à forte tension de bus DC (entrée haute tension du dévolteur), modes qui interviennent aux régimes de forts vents se traduisant par des vitesses de rotation élevées.

Cette limitation va donc dans le sens d'une tension batterie assez élevée, repoussant d'autant les butées. A l'opposé, une tension batterie trop élevée retarde le seuil de mise en conduction du pont de diode à faible vent. Pour la structure de hacheur dévolteur classique, un compromis est donc nécessaire selon le gisement dont on dispose [19].

Ce compromis se pose en des termes différents si l'on utilise une structure de hacheur en pont à commande différentielle, structure parfois aussi nommée « asymétrique ». Cette topologie inclut deux bras complets pilotés autour d'un rapport cyclique 1/2. Malgré une structure légèrement plus complexe que la précédente, l'utilisation d'une batterie basse tension peut justifier son utilisation.

Comme pour la structure basée sur le hacheur dévolteur simple, on utilise la caractéristique de puissance maximale côté batterie en fonction de la tension de bus continu U_{dc} . Ainsi, la même stratégie MPPT que précédemment (Figure 3.12) et l'équation (3-10) est utilisée.

Ainsi les simulations du système éolien complet comprenant la fonction MPPT peuvent être effectuées et comparées selon le niveau de tension de batterie et avec des courbes de référence, donnant une vision de l'efficacité de cette structure. Comme pour les structures précédentes les courbes de puissances effectivement fournies par l'éolienne et les puissances maximales potentielles d'une éolienne fonctionnant à l'optimum sont tracées en premier [20].

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés des différentes structures de conversion d'énergie éolienne, Chaque structure est associée à des stratégies de commande qui utilisent la recherche automatique du point optimal de puissance MPPT. Le prochain chapitre présente les résultats de simulation des différentes structures étudiée et caractérisées dans le cas statique.

4. Introduction

Nous avons étudié et comparé trois structures de conversion statique permettant le pilotage de la génératrice utilisée (machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles). Dans tous les cas, on s'est limité au cas d'un « chargeur de batterie », c'est à dire un ensemble machine convertisseur qui débite sur un élément de stockage. Ces structures ont été en premier lieu comparées sur le plan statique.

La vitesse du vent V_v simulée montrée par la Figure 4.1 est issue d'un échantillon de mesure sur site réel [8] [24].

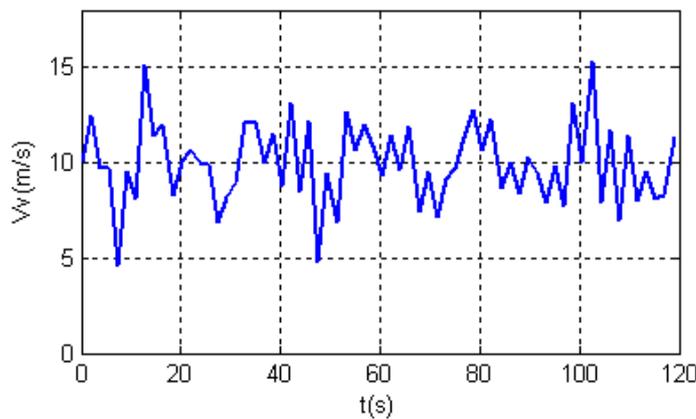


Figure 4.1 : Echantillon de test du vent.

4.1 Résultats de simulation sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

Les courbes de la vitesse de rotation de l'éolienne (*Figure 4.2*) optimisée par le dispositif MPPT flou et de la vitesse de rotation optimale issue du calcul théorique : cette vitesse correspond à un fonctionnement permanent à λ_{opt} .

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad (4-1)$$

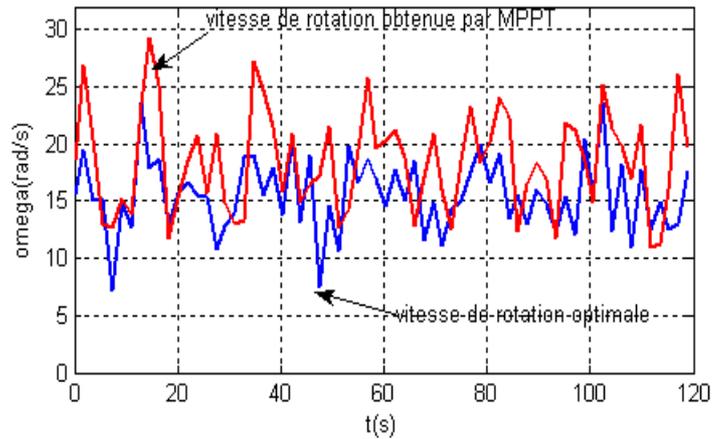


Figure 4.2 : Vitesse de rotation issue de la MPPT et vitesse optimale.

La vitesse de rotation de la turbine éolienne détermine le point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale. La différence entre la vitesse issue de la MPPT et la vitesse optimale se traduit alors par une perte en puissance.

La courbe optimale de puissance est calculée à l'aide de l'expression (3-5) et la courbe de puissance maximisée correspond à la vitesse issue de la MPPT représentée sur la (Figure 4.3).

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \cdot C_p^{opt} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (4-2)$$

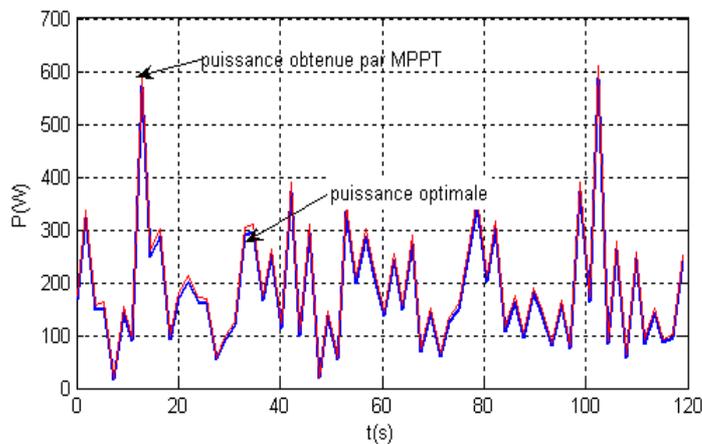


Figure 4.3 : Courbes de puissance.

Le grand inconvénient de cette méthode, qui utilise des variations absolues de la puissance et de la vitesse en entrée, est que la variation n'a pas le même poids selon le point de fonctionnement du système éolien c'est-à-dire selon que la puissance du vent (et la vitesse de rotation) est très élevée ou au contraire petite. Le cas est semblable pour la mesure de puissance. Dans la pratique le système réagit correctement seulement dans une bande restreinte de la vitesse du vent selon les réglages de l'algorithme MPPT. En dehors de cette

zone, il est délicat de bien régler la dynamique du système. Afin de supprimer ces défauts, les variables d'entrée/sortie sont définies en valeurs relatives. Ces variations sont traitées par rapport aux moyennes des grandeurs mesurées [12] [24].

$$\Delta P = 2 \cdot \frac{P[k] - P[k-1]}{P[k] + P[k-1]} \quad (4-3)$$

$$\Delta \Omega = 2 \cdot \frac{\Omega[k] - \Omega[k-1]}{\Omega[k] + \Omega[k-1]} \quad (4-4)$$

$$\Delta \Omega_{ref}[k] = \Omega[k-1] \cdot \frac{2 + \Delta \Omega_{ref}[k]}{2 - \Delta \Omega_{ref}[k]} \quad (4-5)$$

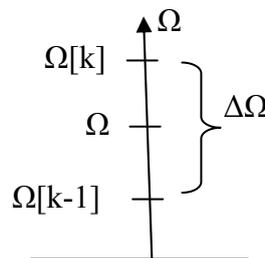


Figure 4.4 : Calcul de la valeur normalisée de la vitesse [12].

Par rapport aux résultats précédents de la Figure 3-14, la vitesse de rotation se rapproche de l'optimum pour toute l'étendue de la vitesse du vent de l'échantillon de la Figure 4.1. Ce qui est montré sur la Figure 4.5.

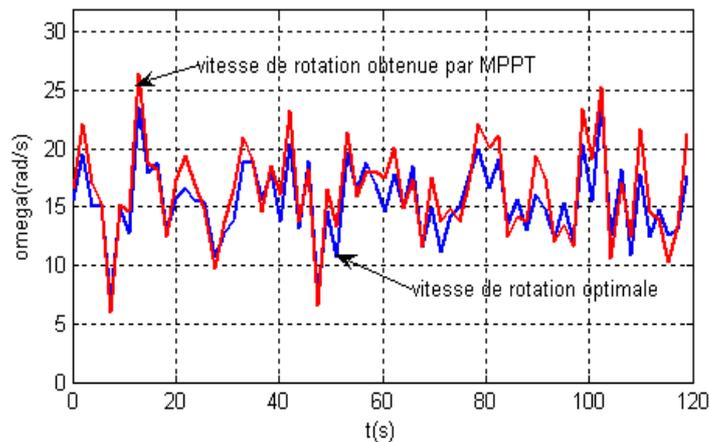


Figure 4.5 : Mesure de vitesse de rotation pour les variables relatives.

Les courbes de la puissance MPPT et celle de la puissance optimale sont présentées sur la Figure 4.6.

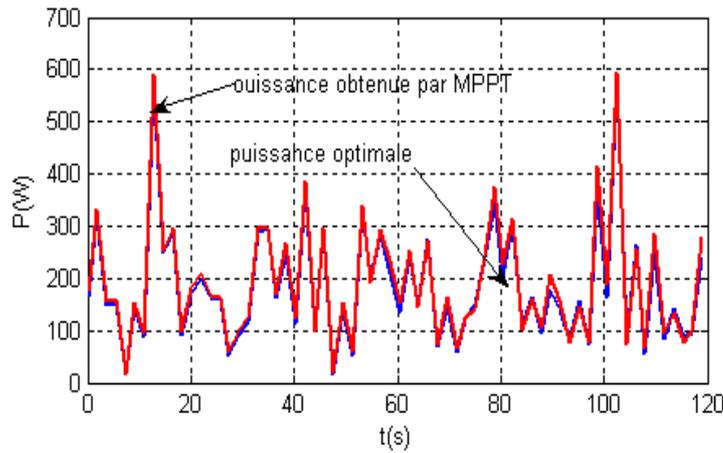


Figure 4.6 : Courbes de puissances – entrées relatives.

Les performances de la MPPT peuvent encore être améliorées. En effet, à cause des fluctuations rapides de la puissance mesurée à la sortie du redresseur MLI, il est préférable de remplacer la variation de la puissance instantanée par la quantité de l'énergie récupérée pendant une période d'échantillonnage du dispositif MPPT, ceci revient à un moyennage de la puissance instantanée. Les variables d'entrée du dispositif MPPT sont donc ΔE et $\Delta \Omega$ relatifs tandis que la variable de sortie reste la même que précédemment.

$$\Delta E[k] = \int U_c \cdot I_c d\tau \tag{4-6}$$

$$\Delta E_{norm}[k] = \frac{\Delta E[k]}{\langle E[k] \rangle} = \frac{2 \cdot \Delta E[k]}{E[k] - E[k-1]} \tag{4-7}$$

La Figure 4.7 montre le fonctionnement du système du point de vue de la vitesse de rotation.

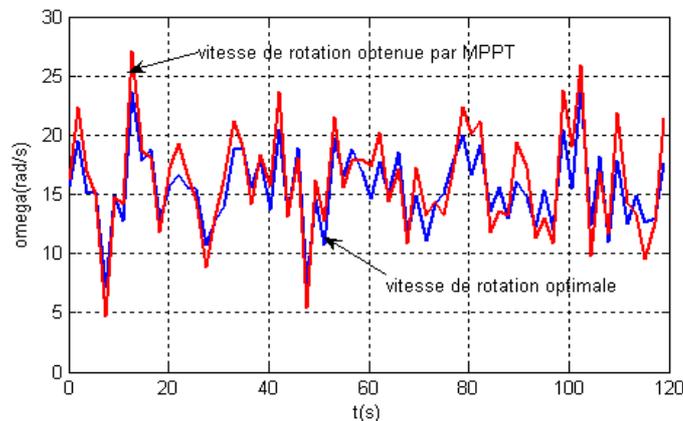


Figure 4.7 : Vitesse de rotation obtenue avec énergie relative en entrée.

La Figure 4.8 donne l'allure des courbes de la puissance maximisée P_{MPPT} et de la puissance optimale P_{opt}

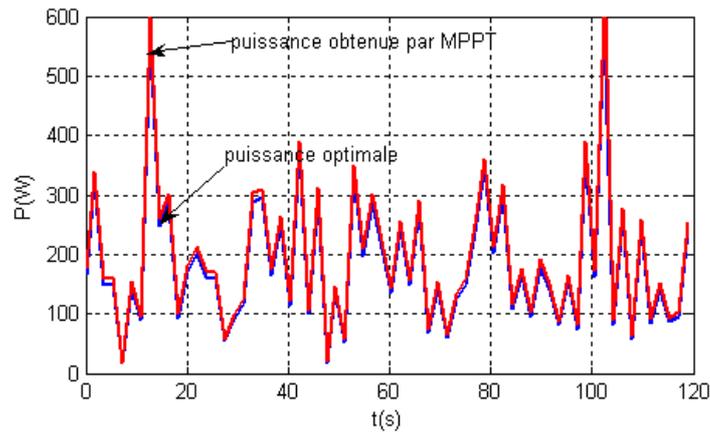


Figure 4.8 : Puissance optimale et maximisée par la MPPT.

La Figure 4.9 donne l'efficacité du système calculée selon l'équation :

$$\eta = \frac{P_{MPPT}}{P_{opt}} \quad (4-8)$$

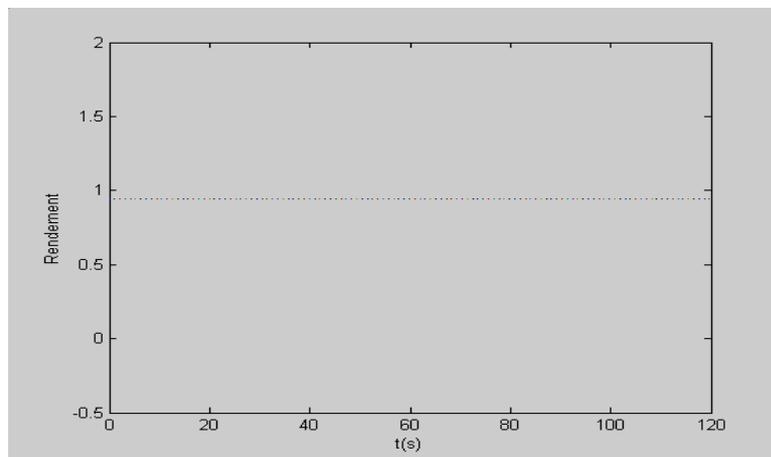


Figure 4.9 : Rendement obtenu grâce à MPPT floue.

La représentation de l'énergie « captée » par le système est un critère d'appréciation pertinent de l'efficacité énergétique. Le calcul de l'écart selon la formule (3-14), entre l'énergie optimale issue de puissance optimale P_{opt} et celle qui est obtenue à l'aide de dispositif MPPT donne un aperçu chiffré de la qualité du prélèvement énergétique sur un laps de temps donné.

La Figure 3-22 donne les courbes de l'énergie issue de l'intégration temporelle des courbes de puissance de la Figure 3-20. C'est l'énergie totale recueillie et l'énergie maximale qui peut être extraite d'un profil de vent donné pendant le temps de test $t=t_1-t_0$. Dans ce cas d'échantillon du vent cet écart est de 7.25%.

$$E = \int_{t_0}^{t_1} P(V_V) dt \quad (4-9)$$

$$\Delta E = E(t = t_1) - E(t = t_0) \quad (4-10)$$

$$\varepsilon_E \% = \frac{\Delta E_{opt} - \Delta E_{MPPT}}{\Delta E_{opt}} \cdot 100 \quad (4-11)$$

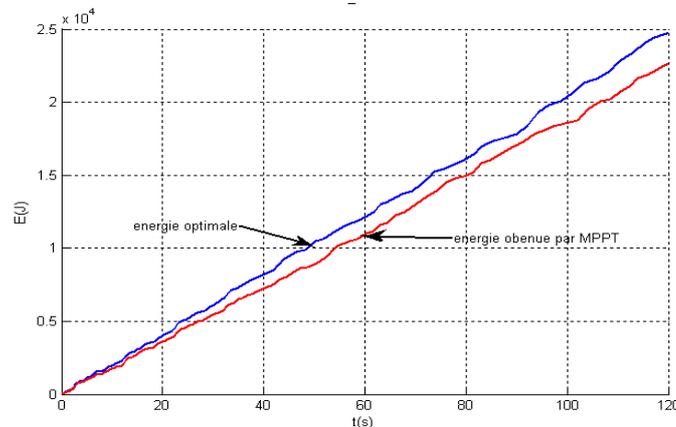


Figure 4.10 : Energie éolienne optimale et maximisée par MPPT.

Pour positionner l'efficacité du système à vitesse variable, des courbes de puissance obtenues à vitesse fixe sont présentées sur la Figure 3-23 ainsi que la courbe de l'indice de rendement (Figure 3-24).

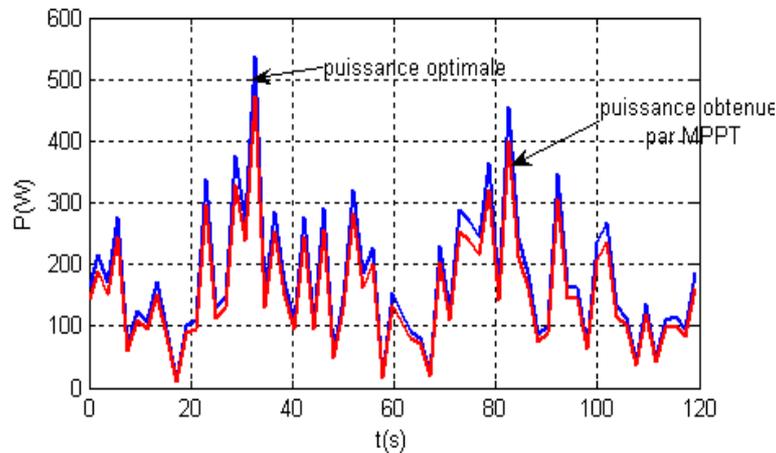


Figure 4.11 : Puissance à vitesse constante.

Pour ce cas de test de vitesse de vent, on constate un gain d'environ 10% sur l'énergie récupérée avec le dispositif MPPT par rapport à un système équivalent, mais fonctionnant à vitesse de rotation constante. La vitesse de rotation utilisée est choisie arbitrairement de façon à débiter un maximum de puissance à une vitesse du vent égale à 9 m/s ce qui équivaut à la puissance maximale de 150W.

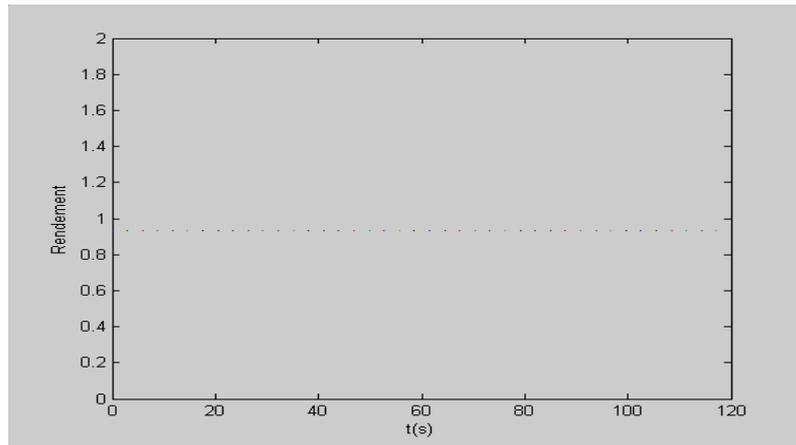


Figure 4.12 : Rendement à vitesse constante.

Le gain en énergie dépend évidemment du type de gisement et en particulier de l'irrégularité du vent.

4.2 Résultats de simulation avec la connaissance de courbe caractéristique de la voilure

4.2.1 Commande indirecte par le pilotage du courant de charge

4.2.1.1 MPPT coté DC

La Figure 4.13 confirme quantitativement cette approche puisque U_{dc} évolue linéairement selon la vitesse de rotation. Les points tracés sont obtenus en charge optimale pour différentes vitesses du vent.

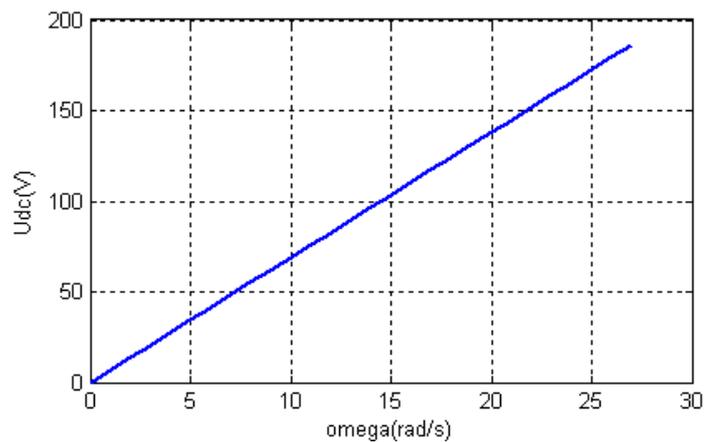


Figure 4.13 : Tension redressée en fonction de la vitesse de rotation en régime optimal.

4.2.1.2 Hacheur dévolteur simple

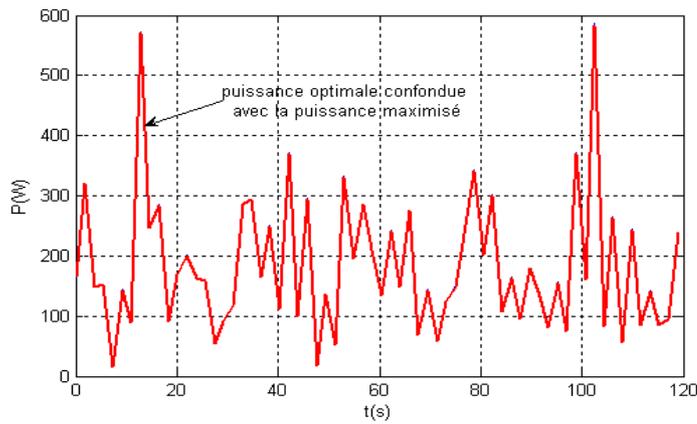


Figure 4.14 : Puissance éolienne.

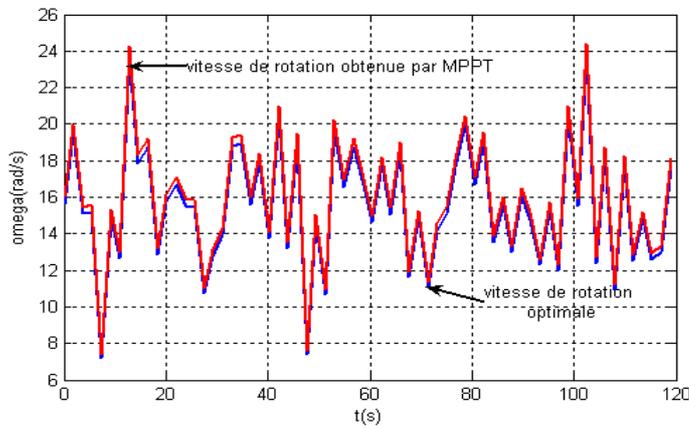


Figure 4.15 : Vitesse de rotation.

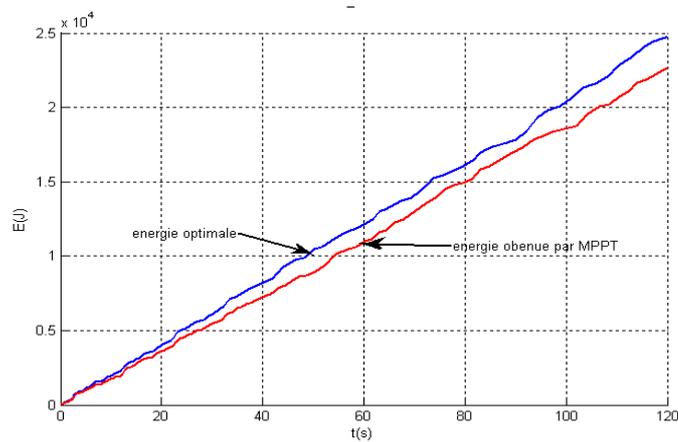


Figure 4.16 : Efficacité énergétique sur l'arbre.

On constate l'efficacité quasiment parfaite de cette stratégie dont témoigne la faible différence entre l'énergie optimale théorique et l'énergie réellement prélevée à l'éolienne :

$$\varepsilon = 0.2\%.$$

La courbe de puissance en fonction de tension redressée est représentée dans la figure suivant :

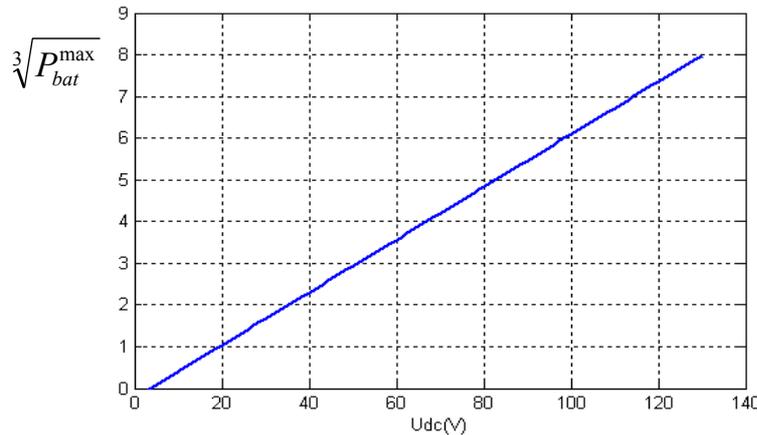


Figure 4.17 : Puissance maximale de batterie (48V) en fonction de la tension redressée.

L'équation (3-10), à la base du dispositif MPPT de la Figure 4.17 en est tirée.

$$P_{bat}^{\max}(U_{dc}) = (a.U_{dc} + b)^3 \quad (4-12)$$

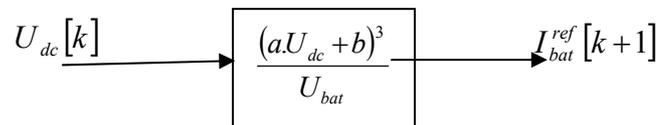


Figure 4.18 : Schéma de pilotage MPPT.

La construction d'une courbe de régime permanent donnant puissance maximale batterie en fonction de la vitesse du vent semble être une bonne solution. Des simulations successives en régime statique ont permis de créer cette caractéristique (Figure 4.18).

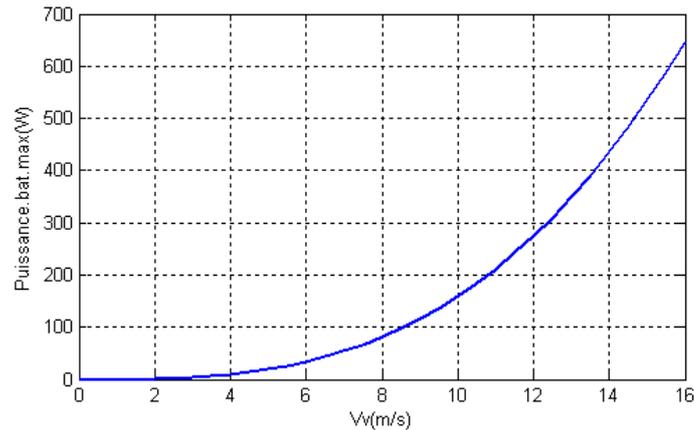


Figure 4.19 : Puissance batterie maximale (à 48V) en fonction du vent (régime statique).

Une comparaison de la puissance batterie maximale obtenue en régime statique à partir du calcul et de la puissance batterie « maximisée » obtenue par la simulation en utilisant le dispositif MPPT côté batterie sont données par la Figure 4.19.

Les courbes énergétiques sont alors données sur la (Figure 4.20) pour les deux batteries avec les résultats de calcul de l'indice énergétique ε selon l'expression (3-14).

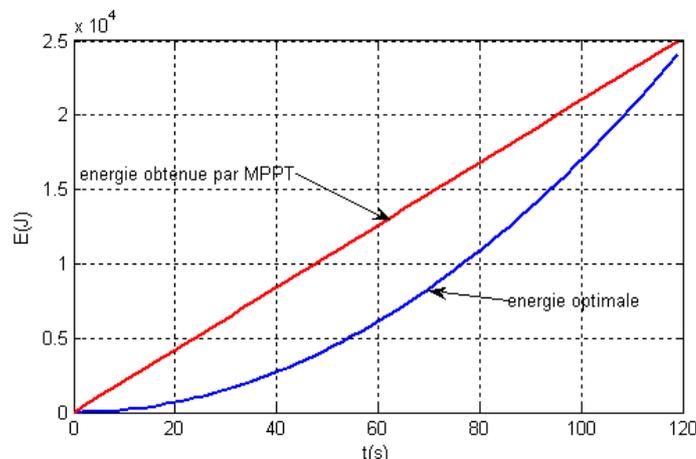


Figure 4.20 : énergies batterie maximale et maximisée par MPPT.

La différence entre l'efficacité énergétique est liée aux pertes dans le hacheur dues au courant deux fois plus important dans l'interrupteur pour la batterie 48V. L'écart ne semble cependant pas être très significatif.

4.2.1.3 Hacheur en pont à commande différentielle

L'interpolation polynomiale de la forme (3-10) est aussi déterminée pour une batterie de 48V. Cette expression sera considérée comme référence.

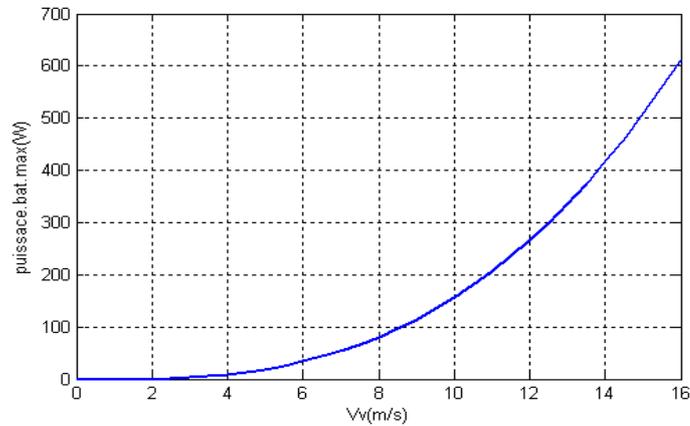


Figure 4.21 : Interpolation polynomiale de la puissance batterie (48V) maximale en statique.

Ainsi les simulations du système éolien complet comprenant la fonction MPPT peuvent être effectuées et comparées selon le niveau de tension de batterie et avec des courbes de référence, donnant une vision de l'efficacité de cette structure. Comme pour les structures précédentes les courbes de puissances effectivement fournies par l'éolienne et les puissances maximales potentielles d'une éolienne fonctionnant à l'optimum sont tracées en premier.

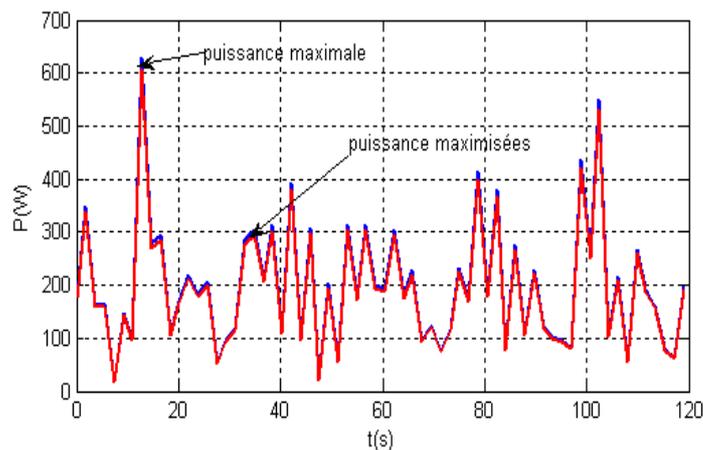


Figure 4.22 : Courbes de la puissance mécanique maximale et mesurée pour le hacheur en pont à $U_{bat}=48V$.

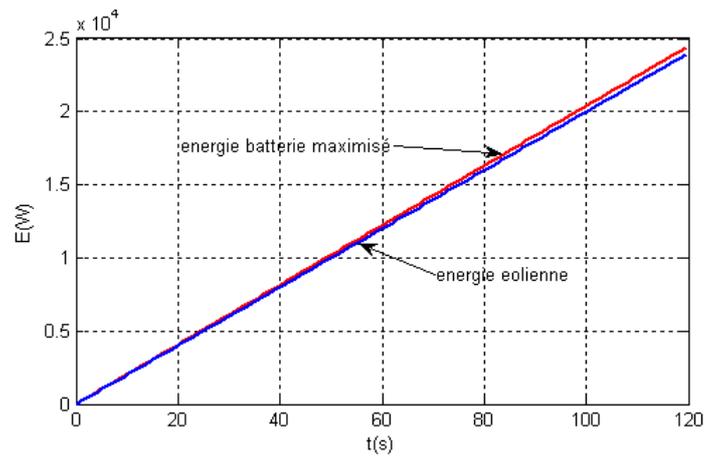


Figure 4.23 : Energie mécanique maximale et maximisé

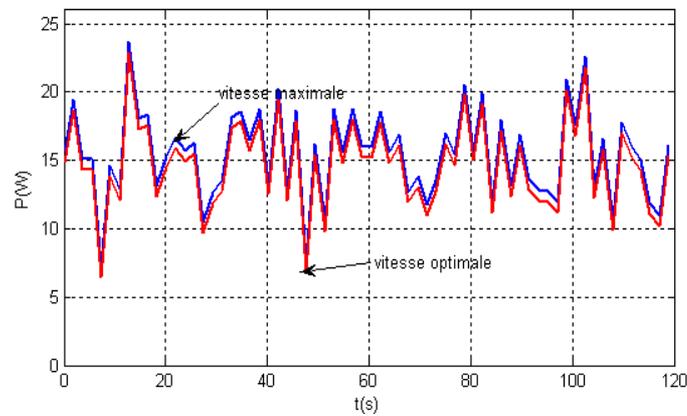


Figure 4.24 : Vitesse de rotation optimale et mesurée (batterie 48V).

Les caractéristiques les plus importantes sont cependant liées à la puissance utile récupérée côté batterie.

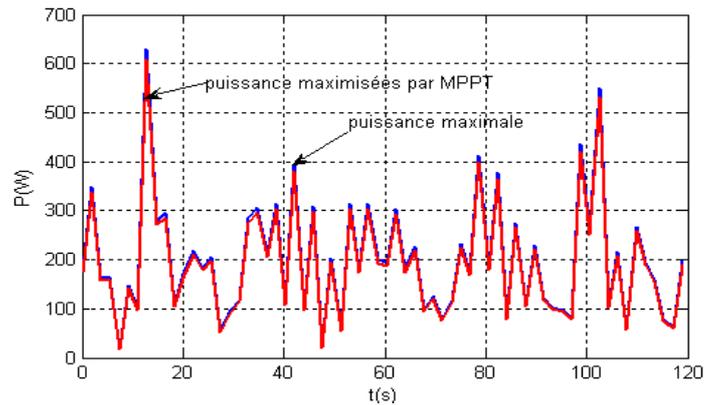


Figure 4.25 : Comparaison des caractéristiques de puissance batterie maximisées par MPPT et maximale pour une batterie de 48V.

La courbe de l'énergie maximisée par MPPT et maximale est illustré sur la Figure 4.26. La courbe de référence de l'énergie E^{max} pour chaque graphique de cette figure est l'énergie calculée par l'intégration temporelle de la puissance maximale en fonction de la vitesse du vent selon l'équation issue de la Figure 4.18 donc pour le cas de la batterie 48V.

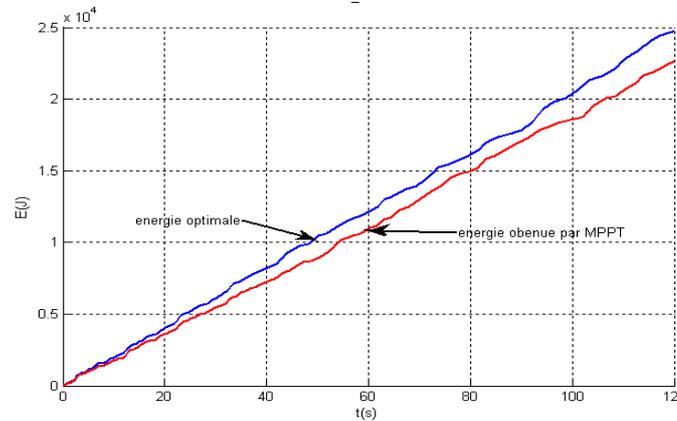


Figure 4.26 : Comparaison des caractéristiques de l'énergie maximisée par MPPT et maximale pour une batterie de 48V.

4.3 Comparaison de l'efficacité énergétique dans le temps

Dans les paragraphes précédents, nous avons abordé la problématique du compromis entre complexité (coût) des solutions structurelles et efficacité énergétique. Dans cette section, toutes les chaînes de conversion et leur gestion énergétique sont comparées du point de vue de l'efficacité énergétique, tant sur des temps courts (comportement dynamique) que longs (fonctionnement quasi statique). La batterie de tension 48V est considérée dans le cas du hacheur dévolteur standard et du hacheur asymétrique. Dans la configuration comportant le redresseur MLI la tension du bus continu est de 300V.

4.3.1 Efficacité énergétique en fonctionnement dynamique : cycle test

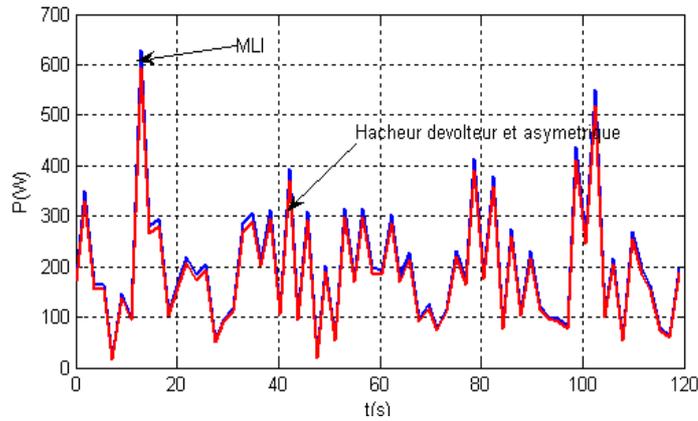


Figure 4.27 : Comparatif des puissances.

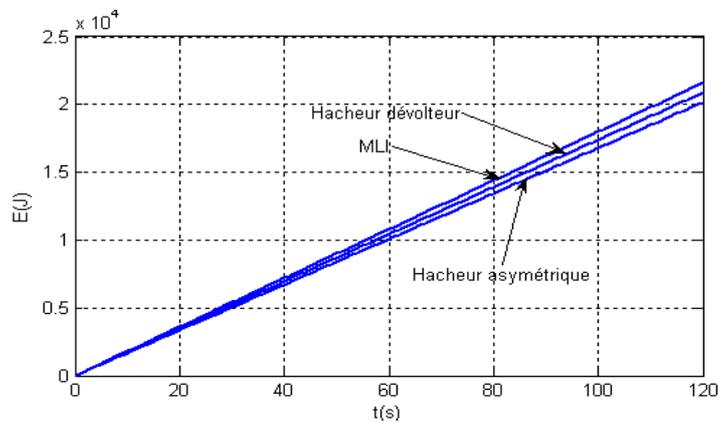


Figure 4.28 : Comparatif de l'énergie.

A noter que ce comparatif est seulement valable pour le profil de vent de test donné. Selon le profil, les conclusions peuvent être différentes en particulier dans des fonctionnements à forts vents où les butées peuvent être approchées.

4.4 Résultats de simulation obtenue à vitesse de vent linéaire

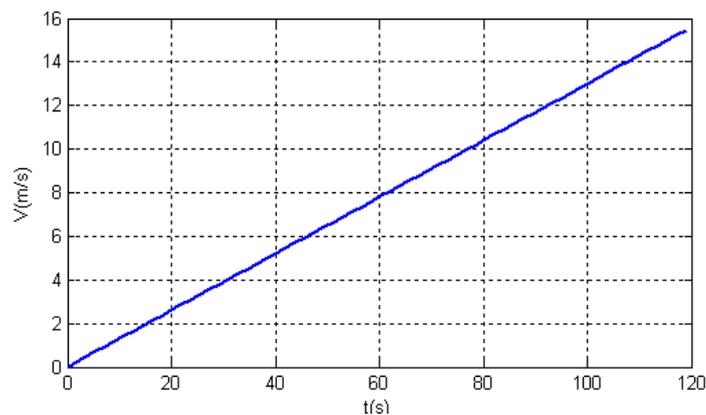


Figure 4.29 : Echantillon de test du vent

4.4.1 Résultats de simulation sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

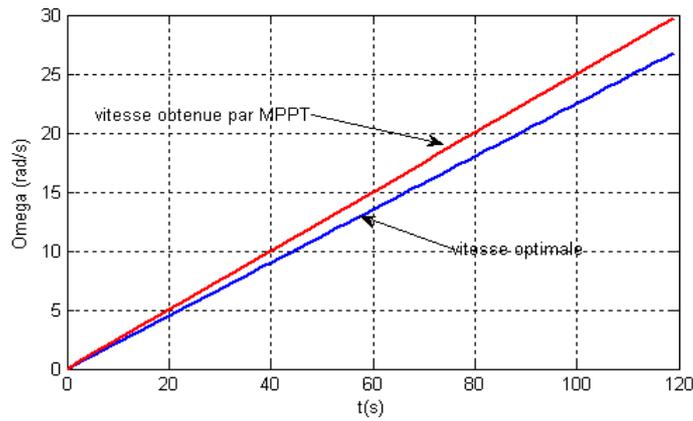


Figure 4.30 : Courbes de Vitesse de rotation,

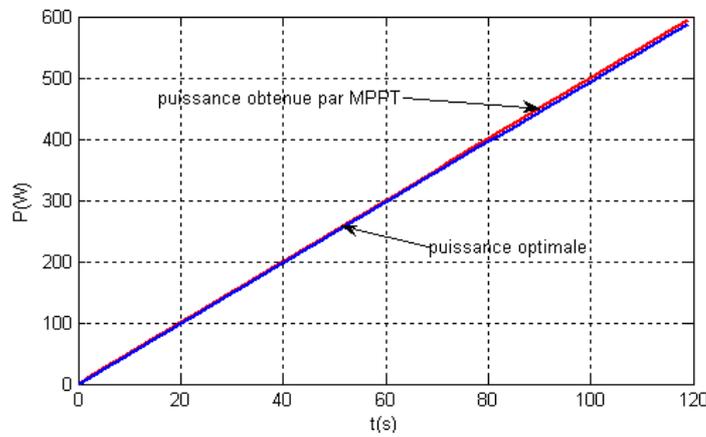


Figure 4.31 : Courbes de puissance.

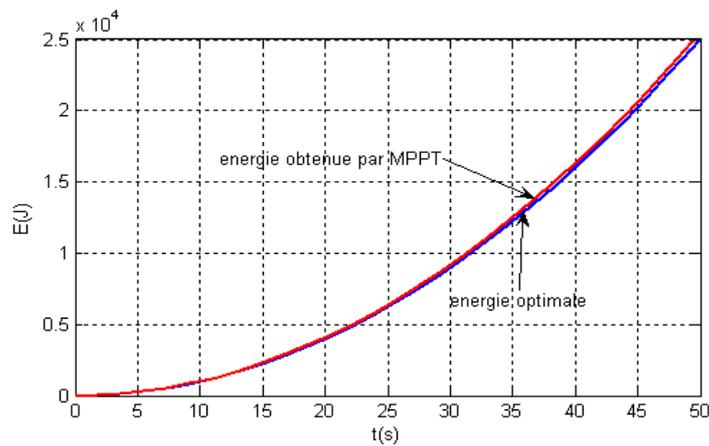


Figure 4.32 : Courbes de l'énergie,

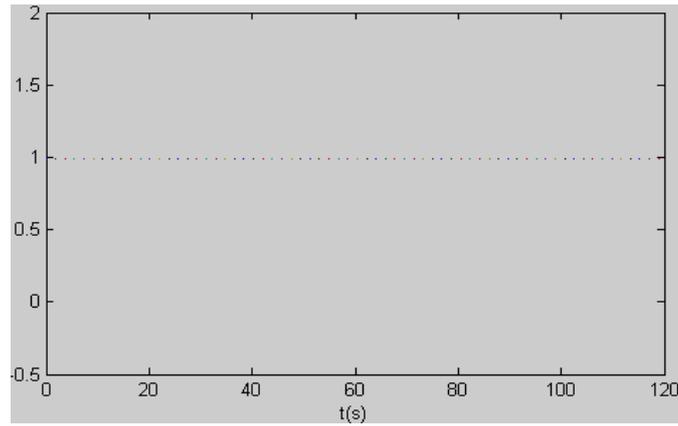


Figure 4.33 : Courbes de Rendement obtenu grâce à MPPT floue

4.4.2 Résultats de simulation avec la connaissance de la courbe caractéristique de la voile

4.4.2.1 Résultats de simulation pour l'hacheur dévolteur simple

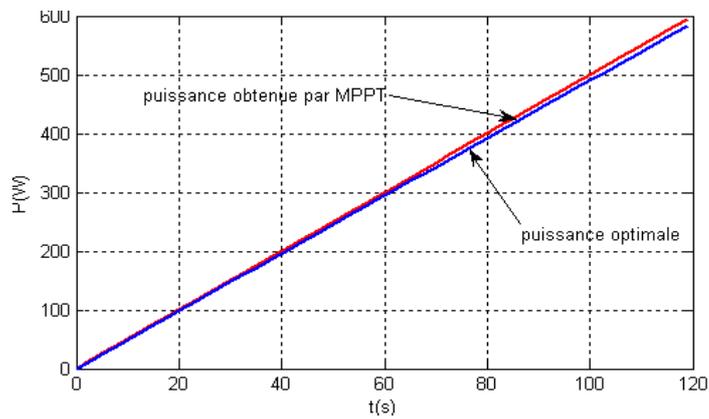


Figure 4.34 : puissances éolienne

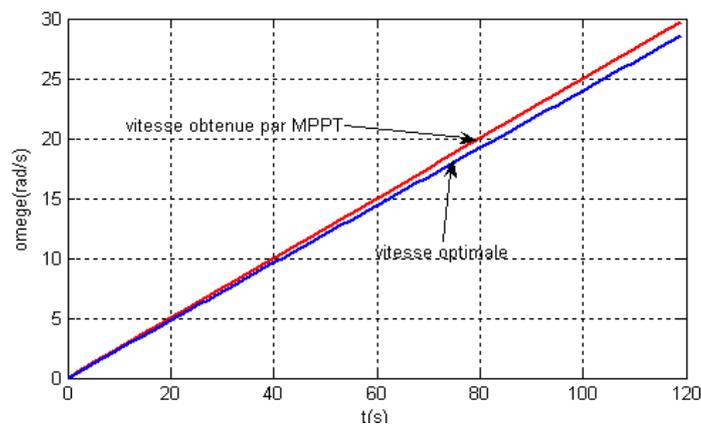


Figure 4.35 : Vitesses de rotation

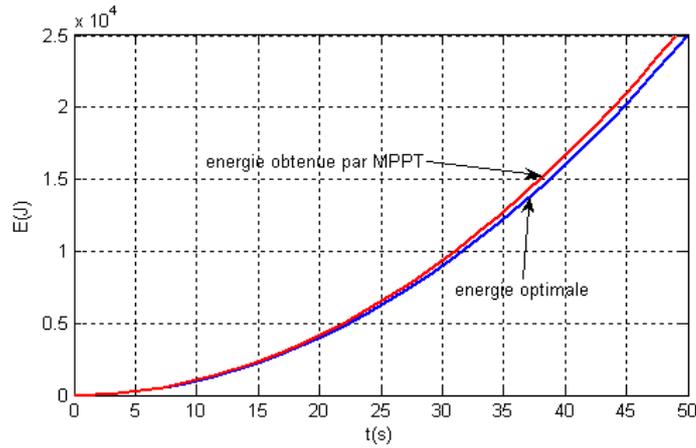


Figure 4.36 : Efficacité énergétique,

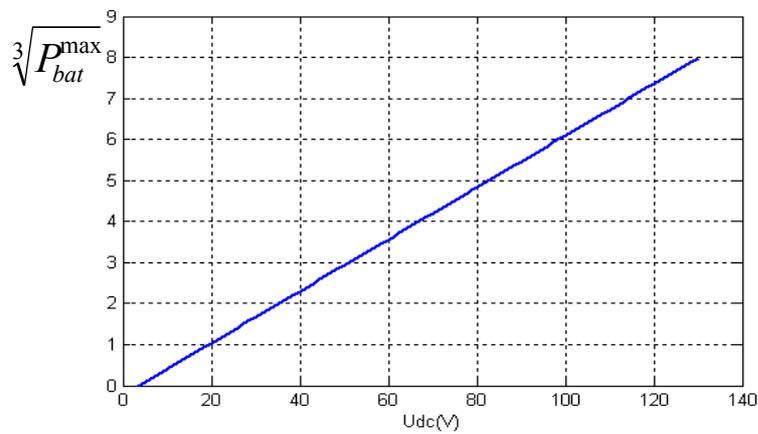


Figure 4.37 : Puissance maximale de batterie 48V en fonction de la tension redressée.

4.4.2.2 Résultats de simulation pour l'hacheur asymétrique

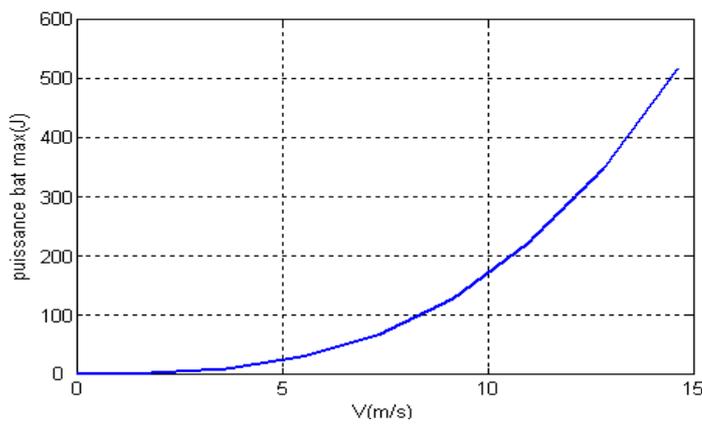


Figure 4.38 : Puissance batterie maximale (48V) en fonction du vent.

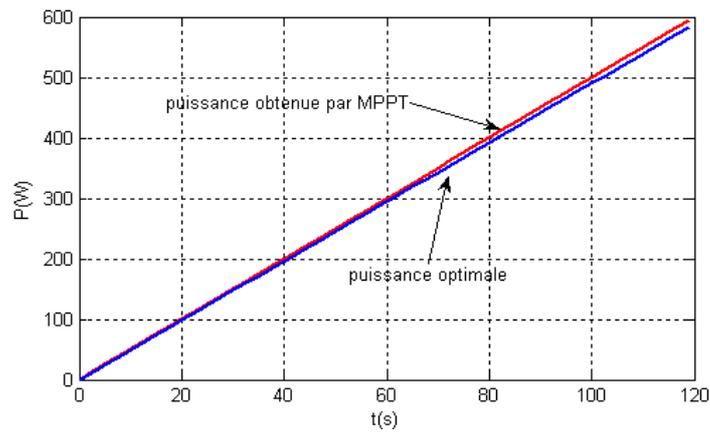


Figure 4.39 : Puissances batterie (48V) optimale et maximisée par MPPT.

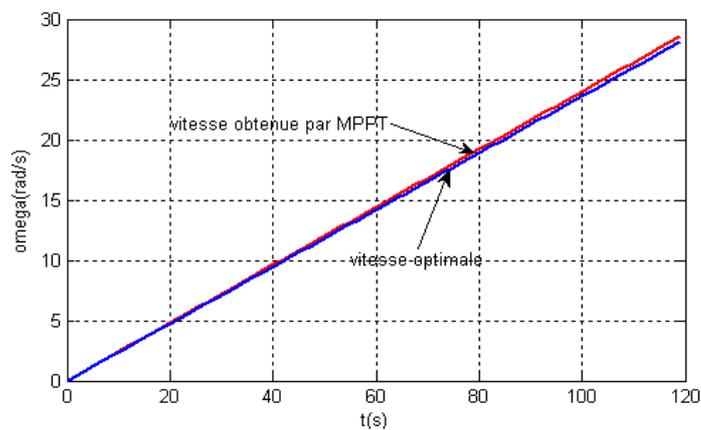


Figure 4.40 : vitesses de rotation.

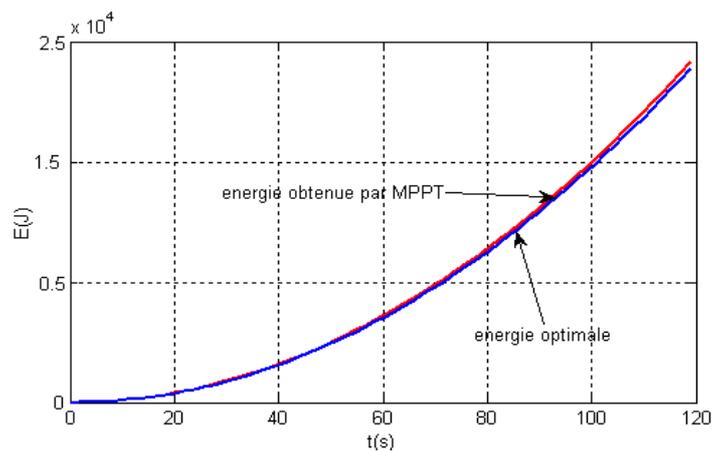


Figure 4.41 : Efficacité énergétique.

Selon le profil du vent de test, les conclusions peuvent être différentes en particulier dans des fonctionnements à forts vents où les butées peuvent être approchées.

Les caractéristiques les plus importantes sont cependant liées à la puissance utile récupérée côté batterie.

4.5 Conclusion

Pour chaque structure de conversion, quelques bilans énergétiques sont aussi présentés pour différents cycles statistiques du vent. Le Tableau 4-1 donne des appréciations qualitatives qui comparent les diverses approches développées dans ce chapitre.

Tableau 4-1 : Comparatif qualitatif des critères du choix de structure.

Structure Critère	MLI - MPPT floue	Pont de diodes et hacheur dévolteur	Pont de diodes et hacheur asymétrique	Couplage direct pont de diodes - batterie
Dimensionnement de la génératrice	+++	++	++	++
Dimensionnement de la batterie	-	++	+++	++
Coût de convertisseur statique	-	++	+	+++
Simplicité de contrôle	-	+++	++	+++
Efficacité énergétique	+	+++	++	++

Chaque symbole +/- représente la simplicité ou complexité, le dimensionnement contraignant ou pas etc. Ces critères sont directement liés aux coûts de système. En fonction du site éolien (vitesse moyenne), ce tableau et les graphiques précédents permettent de trouver la solution la plus adaptée.

Cette dernière remarque révèle le couplage fort existant sur ce type de chaînes d'énergie entre gisement – structure – dimensionnement – gestion d'énergie – consommation : ce type d'interactions fortes, dans un contexte interdisciplinaire est à la source de la complexité mais aussi de l'intérêt d'une approche système en Génie Electrique.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons abordé les problématiques posées par la conception d'une chaîne de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance. Dans une approche de conception système, nous avons abordé de façon intégrée les questions d'architecture, de dimensionnement et de gestion optimisée de l'énergie.

Nous avons étudié et comparé trois structures de conversion statique permettant le pilotage de la génératrice utilisée (machine WR-02). Dans tous les cas, on s'est limité au cas d'un « chargeur de batterie », c'est à dire un ensemble machine convertisseur qui débite sur un élément de stockage. Ces structures ont été en premier lieu comparées sur le plan statique.

Les techniques MPPT diffèrent aussi selon l'architecture et selon la connaissance de la caractéristique de la voilure. Dans le cas où l'on ne connaît pas a priori la voilure, une recherche opérationnelle (MPPT) a été proposée grâce à un algorithme basé sur la logique floue. Le grand avantage de cette technique est qu'elle s'adapte à toute voilure presque instantanément sans mesures supplémentaires.

En connaissance de la courbe $C_p(\lambda)$, différentes techniques de pilotage peuvent être employées, selon que l'on utilise un redresseur à diodes associé à un hacheur dévolteur (contrôle de puissance par le courant de batterie). Cette technique, malgré son caractère « indirect » (pilotage de la puissance à travers l'ensemble pont de diodes – génératrice) s'est avérée plutôt performante comparativement aux structures à autopilotage à bande passante élevée. Une étude fréquentielle des effets variationnels du vent a permis d'expliquer ce résultat, de par le fait que la dynamique de réglage n'influe que sur une bande fréquentielle intermédiaire.

Dans le choix final de la meilleure structure, nous avons montré l'interaction entre plusieurs paramètres tels que le profil du vent. Au final, dans cette gamme de puissance et moyennant un dimensionnement système adéquat, l'application de différents gisements éoliens nous a permis de conclure à l'excellente compétitivité du circuit le plus simple vis à vis du compromis coût / performance : association pont de diodes - hacheur abaisseur de tension. Malgré que le dispositif MPPT soit fiable dans tous les cas étudiés, on remarque les grandes différences en quantité d'énergie selon la configuration et le profil du gisement éolien.

Pour assurer une plus grande disponibilité en énergie, plusieurs ressources renouvelables peuvent être interconnectées ensemble (éolien – photovoltaïque – piles à combustibles).

- [1] O. Gergaud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de Docteur de l'École Normale Supérieure de Cachan, France, 9 Décembre 2002.
- [2] V. Rogez « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », Thèse de Docteur de l'Université d'Artois, France, 17 Décembre 2004.
- [3] H. Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Bordeaux, France, 18 Décembre 2003.
- [4] A.D.Diop, "Contribution au Développement d'un Simulateur Electromécanique d'Aérogénérateurs : Simulation et Commande en Temps Réel d'une Turbine de Puissance Moyenne à Angle de Calage Variable", Thèse de doctorat, Université du Havre, 8 juillet 1999.
- [5] F. Youcef Ettoumi, « Modélisation multi paramètres en météorologie. Evaluation des énergies renouvelables », thèse of doctorat, USTHB, 06 janvier 2002.
- [6] D. Le gourieres., « Energie éolienne », Théorie Conception et Calcul Pratique des Installations, édition Eyrolles, Paris, 1982.
- [7] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [8] N. Kasbadji Merzouk « Evaluation du gisement éolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de Doctorat en Physique énergétique, Tlemcen, Algérie, Mai 2006.
- [9] F. Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Docteur de l'Université de Nantes, France, 19 Décembre 2003.
- [10] Haritza CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » Thèse de Doctorale, Ecole Nationale Supérieure d'Arts Métiers, Centre de Bordeaux, décembre 2003.
- [11] Frédéric POITIERS, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation de L'énergie Eolienne», Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Le 19 décembre 2003.

- [12] A.Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Docteur de l'Université de Toulouse, France, 5 Avril 2005.
- [13] Alain.H.CHAUVIN « L'éolienne Savonius. Etude aérodynamique et performances mécaniques », 12èmes Journées Internationales de Thermique.
- [14] G. Cimuca « Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens », Thèse de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Lille, France, 2005.
- [15] Bayram Tounsi « Etude comparative de groupes électrogènes embarqués à large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanents et conversion statique », Thèse de Docteur de L'institut National Polytechnique de Toulouse, France, 30 Janvier 2006.
- [16] DE BERNARDINIS Alexandre « Etude et optimisation d'un ensemble alternateur a aimants / redresseur commandé », Thèse de Docteur de L'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 19 décembre 2000.
- [17] Jean-Philippe MARTIN « Contribution a L'alimentation en Tension de Machine Synchrone a Aimants Permanents a Nombre de Phases Elevé, Fonctionnement Normal et Dégradé », Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 22 Juillet 2003.
- [18] P. Berlu, "Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.
- [19] V. Rogez, "Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux.," Thèse de Docteur de l'Université d'Artois, France, 17 Décembre 2004.
- [20] O. Fadli, "Modélisation et commande non linéaire de l'association machine synchrone à aimant permanent-onduleur de tension à trois niveaux," Thèse de Magister de l'Université de Batna, Algérie, 18 Juin 2004.
- [21] H. BOUZEKRI "Contribution à la commande des machines synchrones à aimants permanents" Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy, 1995.
- [22] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, "Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'ingénieur D3960, Novembre 2004.
- [23] P. BAUER, S.W.H. DE HAAN, C.R. MEYL, JTG. PIERIK, « Evaluation of Electrical Systems for offshore Windfarms », CDROM. 2000.

[24] Site Internet :

www.mem-algeria.org: Ministère de l'énergie et des Mines.
www.eole.org: Information développement éoliennes.
www.eoliennes.free.fr: Auto construction d'une éolienne.
www.ewea.org: European Wind Energy Association.
www.francaise-d-eoliennes.com: Développement et financement des parcs éoliens.
www.gefer.univ-artois.fr: Université de l'éolien.
www.suisse-eole.ch: Asso Suisse pour l'énergie éolienne.
www.dewind.de: Installateur ensemblier puissance > 600KW Distributeur Dewind.
www.aventa.ch: Fabricant Ingénierie domaine éolien.
www.bonus.dk: Fabricant puissance > 600KW.
www.cabinetgerma.com: Ingénierie domaine éolien Puissance > 600KW.
www.cita-wind.com: Fabricant concepteur aérogénérateurs carénés.
www.ecolabenergies.fr: Fabricant d'éoliennes de pompage OASIS.
www.espace-eolien.fr: Espaces éoliennes et Développement.
www.eneria.com: Ingénierie et installation de centrales éoliennes.
www.eoleres.com: ingénierie et installation de centrales éoliennes.
www.gamesa.es: Ensemblier (660KW-2MW).
www.innovent.fr, www.lagerway.nl: Installateur distributeur 2,5KW à 2MW.
www.nordex.dk; www.nordex.ch: Fabricant puissance > 600KW-2,5MW
www.ostwind.fr: Fourniture et installation de matériel éolien.
<http://www.travere.com>: Ensemblier-installateur petit éolien (200W-12KW).
www.turbowinds.com: Ensemblier Installateur éolien (400KW-1,5MW).
www.vergnet.fr: Ensemblier Installateur photovoltaïque, éolien (5-220KW).
www.vestas.com: fabricant puissance > 600KW.
www.perso.wanadoo.fr: Toits photovoltaïques, éoliennes raccordés au réseau.
www.powersimtech.com: simulation technique des puissances.