

Optimisation du transfert d'énergie d'une éolienne par convertisseur buck-boost

Jacky BRESSON, Fabrice FRUGIER, Didier DUCLOS
 IUT de Perpignan, département G.I.M.
 Ch. de la Passio Vella, BP 79905 - 66962 PERPIGNAN Cédex 9
 E.mail : bresson@univ-perp.fr
 Site internet : <http://gim.iut.univ-perp.fr>

THEMATIQUE – Energie – Environnement - 60^{ième} – 63^{ième} section

RESUME – La caractéristique puissance-vitesse de rotation d'une éolienne présente un optimum qui varie avec la vitesse du vent. Pour maximaliser le transfert énergétique de l'éolienne vers l'utilisateur, il convient de fonctionner à vitesse de rotation variable en adaptant la charge aux fluctuations de vents. Pour cela, une étude est menée sur la réalisation d'un convertisseur DC/DC de type buck-boost commandé par un algorithme de recherche extrême MPPT couplé avec le suivi de la courbe de puissance optimale de l'éolienne. Des essais en soufflerie avec des vitesses de vent de plus de 80 km/h ont permis de valider l'étude. Les résultats obtenus sont encourageants puisque le gain énergétique est de plus de 40%.

Mots-clés – Convertisseur DC-DC inductif, buck-boost, MPPT, charge active.

1. INTRODUCTION

Lors des précédentes sessions du concours national Gim'Eole¹, les étudiants de l'Institut Universitaire de Technologie avaient présenté une éolienne urbaine à « pales annulaires » [1]. Bien qu'ayant obtenu de très bons résultats (2^{ème} en 2014 et 1^{er} en 2015), le système de conversion énergétique était minimaliste (redresseur triphasé à diodes placé derrière la génératrice synchrone). Ce montage simple et efficace n'assure pas l'extraction optimale de la puissance du vent puisqu'elle est tributaire de la charge.

Nous proposons, pour optimiser le fonctionnement de l'éolienne, d'interposer un convertisseur continu/continu de type buck-boost entre redresseur et charge. Ce quadripôle fonctionne comme une « charge active » et présente à l'éolienne la charge optimale quelle que soit la vitesse du vent et la charge utilisateur. Un algorithme de recherche de la puissance maximale de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) est développé afin de piloter le buck-boost.

¹ Concours national Gim'Eole « Les éoliennes urbaines » – Villeurbanne 2014 et 2015.

2. PUISSANCE DE L'ÉOLIENNE A PALES ANNULAIRES

Pour une éolienne de surface $A=\pi R^2$ soumise à un vent de vitesse V_1 , la puissance récupérée sur le rotor s'écrit :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p(\lambda, \alpha) P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \alpha) V_1^3 \quad (1)$$

Où $C_p(\lambda, \alpha)$ correspond au coefficient de puissance qui dépend de l'angle de calage α (d'inclinaison) de la pale et de la vitesse spécifique :

$$\lambda_o = \frac{U_o}{V_1} = \frac{\Omega R}{V_1} = \frac{2\pi NR}{V_1} \quad (2)$$

avec Ω (rd/s) et N (tr/s) : vitesse de rotation du rotor

Dans le cas de l'éolienne à pales annulaires de diamètre 0,8m et d'angle de calage $\alpha=28^\circ$ [1], on remarque (fig.1) que pour chaque valeur de la vitesse du vent, on a un point de fonctionnement où la puissance est maximale. Ce point correspond à une valeur unique de la vitesse de rotation N (tr/s) du rotor.

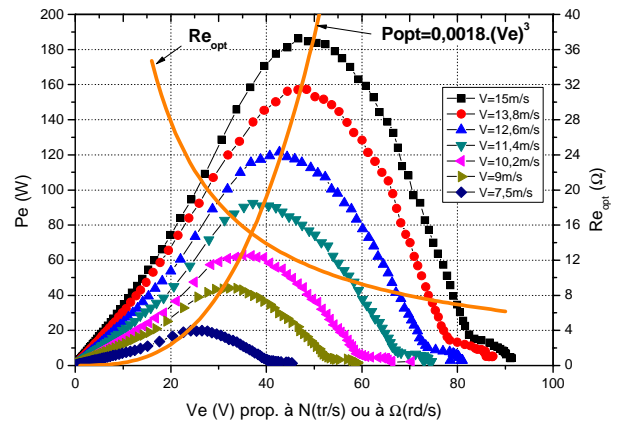


Fig.1 Puissance de l'éolienne à pales annulaires en fonction de la tension de sortie du redresseur V_e (proportionnelle à N tr/s) et lieu des P_{max} associé à R_{opt} , pour plusieurs valeurs de la vitesse du vent.

L'aérogénérateur fournit donc une puissance électrique qui dépend de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation du rotor. Le lieu des puissances maximales suit une loi en Ω^3 .

En effet, compte tenu des relations (1) et (2), la puissance de l'éolienne devient :

$$P_{\text{éolienne}} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \alpha) \left(\frac{\Omega R}{\lambda \omega} \right)^3 \quad (3)$$

Au point de fonctionnement optimal ($C_{p_{\text{opt}}}$ pour $\lambda_{\omega_{\text{opt}}}$) alors :

$$P_{\text{éolienne-opt}} = \frac{1}{2} \rho A C_{p_{\text{opt}}} \left(\frac{R}{\lambda_{\omega_{\text{opt}}}} \right)^3 \Omega_{\text{opt}}^3 = K_{\text{opt}}^{\Omega} \Omega_{\text{opt}}^3 \quad (4)$$

La caractéristique tension/vitesse de rotation de la génératrice synchrone permet d'accéder indirectement à la vitesse de rotation N (tr/s) à partir de la mesure de la tension V_e en sortie du redresseur (fig.2).

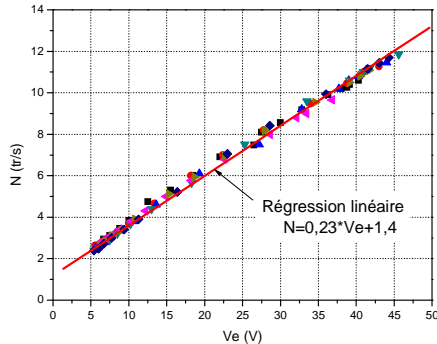


Fig.2 Caractéristique tension/vitesse de rotation de la génératrice.

Ainsi la puissance optimale suit la loi en V_e^3 :

$$P_{\text{éolienne-opt}} = K_{\text{opt}}^{\Omega} \Omega_{\text{opt}}^3 = K_{\text{opt}}^N N_{\text{opt}}^3 = K_{\text{opt}}^{V_e} V_e^3 \quad (5)$$

Avec $K_{\text{opt}}^{V_e} = 0,0018$

Pour maximiser le transfert d'énergie, il conviendra de se placer au point optimal de chacune des courbes de la figure 1. Pour cela, l'intensité I dans la charge devra évoluer en V^2 et la résistance de charge en $1/V$:

$$P_{\text{éolienne-opt}} = K_{\text{opt}}^{V_e} V_e^3 = V_e I_e$$

$$\text{Soit : } I_e = K_{\text{opt}}^{V_e} V_e^2 \text{ ou bien } V_e = \sqrt{\frac{I_e}{K_{\text{opt}}^{V_e}}} = 23,6 \sqrt{I_e} \quad (6)$$

$$\text{Et : } R_{e_{\text{opt}}} = \frac{I}{K_{\text{opt}}^{V_e} V_e} = \frac{555,6}{V_e}$$

Dans ces conditions la captation de l'énergie optimale se fera à vitesse de rotation N (tr/s) variable avec tous les bénéfices qu'offre un tel fonctionnement :

- gain énergétique augmenté,
- contraintes moindres sur l'éolienne.

Deux approches sont envisageables :

- Dans le cas où le coefficient $K_{\text{opt}}^{V_e}$ peut être déterminé, il suffit de suivre la courbe de la puissance optimale en modifiant l'angle de calage des pales (système pitch), méthode utilisée pour les éoliennes de puissance.

- Dans le cas où le coefficient $K_{\text{opt}}^{V_e}$ n'est pas connu, on utilisera un algorithme de recherche extrémal de type MPPT, méthode qui est privilégiée pour les petits aérogénérateurs (quelques kW). La recherche du maximum de puissance utilise un convertisseur statique DC/DC qui adapte en permanence la charge électrique à la caractéristique de l'éolienne.

3. OPTIMISATION DU TRANSFERT D'ENERGIE.

Le rotor de l'éolienne est connecté à la génératrice synchrone à aimants permanents (fig.3). Les signaux triphasés issus de la génératrice sont redressés par un pont double alternance PD3. La tension continue V_e légèrement ondulée en sortie du redresseur est filtrée par la capacité $C1$.

Le convertisseur DC/DC, piloté par le module MPPT, assure la recherche de la puissance maximale, indépendamment des fluctuations du vent et de la charge de sortie.

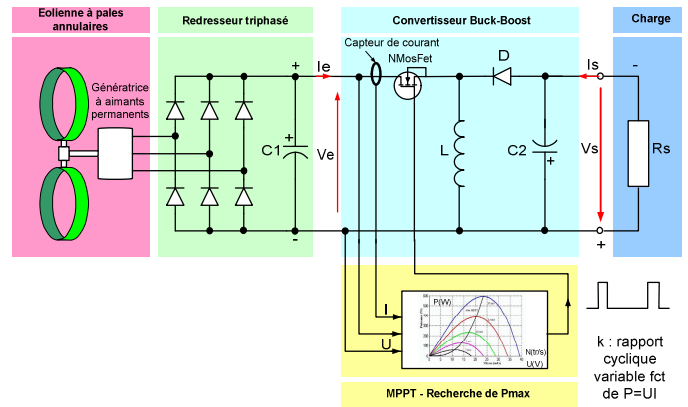


Fig.3 Synoptique de la chaîne de puissance.

3.1. Etude du convertisseur buck-boost.

Le montage est constitué d'un NmosFet qui fait office d'interrupteur électronique commandé par un signal rectangulaire de fréquence 22,8 kHz, de rapport cyclique k .

En mode continu, dans l'intervalle $0 < t < kT$ le NmosFet conduit, la self L se charge linéairement à la tension V_e . Cette énergie est ensuite restituée à la capacité $C2$ à travers la diode D lorsque le NmosFet est bloqué dans l'intervalle $kT < t < T$. La tension de sortie V_s devient alors négative et égale à [2] :

$$V_s = \frac{k}{1-k} V_e \quad (7)$$

Cette tension peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée, selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur de tension.

En supposant un rendement de 1, alors $V_s I_s = V_e I_e$, le courant moyen d'entrée et la résistance apparente à l'entrée du convertisseur peuvent s'exprimer par :

$$I_e = \frac{k}{1-k} I_s \rightarrow R_e = \frac{V_e}{I_e} = \left(\frac{1-k}{k} \right)^2 R_s \quad (8)$$

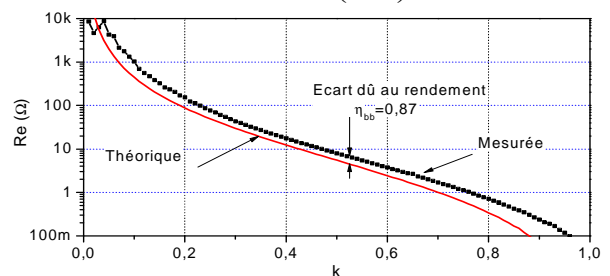


Fig.4 Evolution de la résistance d'entrée du buck-boost en fonction du rapport cyclique ($R_s=5,5\Omega$).

La différence entre les 2 courbes provient essentiellement du rendement $\eta_{bb}=0,87$ du convertisseur DC/DC que nous avons mesuré.

La résistance d'entrée $R_e=V_e/I_e$ du convertisseur n'est autre que la résistance vue par le redresseur. Ainsi, la variation

de cette résistance, par l'intermédiaire de k (fig.4) va permettre de « charger » plus ou moins la génératrice pour se placer au point optimal de fonctionnement (P_{opt}) :

- $k=0 \rightarrow Re = \infty \rightarrow$ éolienne en circuit ouvert (à vide)
- $k=1 \rightarrow Re=0 \rightarrow$ éolienne en court-circuit (charge max)

Le convertisseur buck-boost fonctionne comme une charge active.

3.2. Algorithme de recherche de la puissance maximale.

La mesure de la puissance électrique Pe , en entrée du buck-boost, se fait par le prélèvement de la tension Ve (sonde diff. de tension) et du courant Ie par un capteur de courant à effet hall (fig.3 et 7).

Le microcontrôleur, dédié au module MPPT, assure la génération du signal MLI (modulation de largeur d'impulsion) de commande de la grille du NMosFet, de rapport cyclique k .

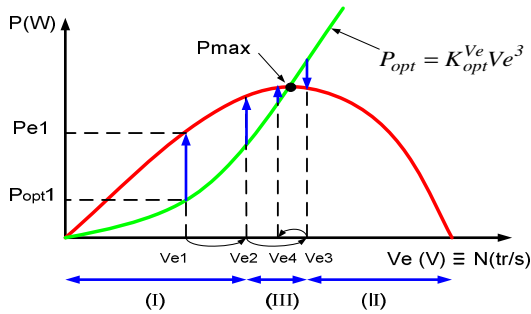


Fig.5 Convergence vers la puissance maximale.

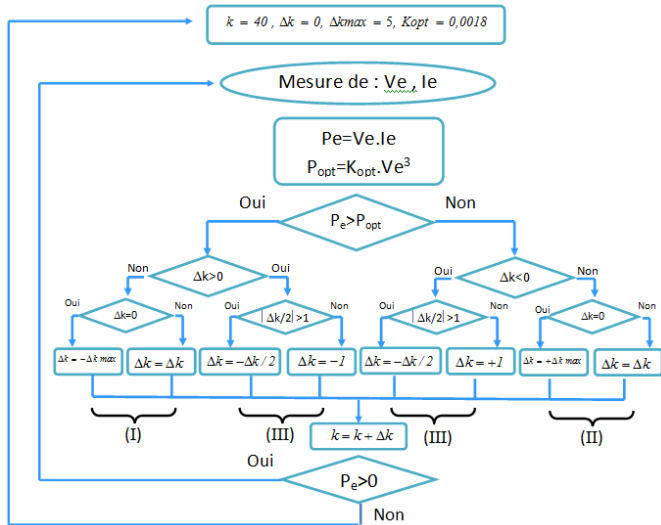


Fig.6 Organigramme de recherche de la puissance maximale (MPPT).

La valeur de k dépend de l'écart entre la puissance mesurée Pe et celle déduite de la courbe de la puissance optimale P_{opt} (fig.5). Nous utiliserons un algorithme mixte entre la méthode « Perturbations et Observations » classique et la courbe de la puissance optimale P_{opt} [3,4,5]. Cela assure une meilleure convergence surtout aux grandes fluctuations de vent.

La « traque » du point de puissance maximale s'effectue de la façon suivante (fig.5) :

- La mesure de Ve et Ie permet de déterminer Pe et P_{opt} ,
- Si $Pe > P_{opt}$ (zone I) on diminue k de Δk ce qui fait augmenter Re entraînant un couple électromagnétique plus faible et donc une augmentation de la vitesse de rotation du rotor. On se rapproche de P_{max} ,

- Lorsque la condition $Pe > P_{opt}$ s'inverse (zone II), le point optimal P_{max} est dépassé, il convient d'incrémenter k de $\Delta k/2$ jusqu'à ce que la condition s'inverse à nouveau,
- Après plusieurs itérations en zone III, le point P_{max} est atteint.

Nous retrouvons cette stratégie de commande sur l'organigramme figure 6 où un pas variable (divisé par 2 à chaque dépassement du maximum) est adopté pour converger plus rapidement vers P_{max} .

4. SCHEMA ET CARTE ELECTRONIQUE

L'interface du transistor hacheur NMosFet est du type flottant et isolé galvaniquement du microcontrôleur par l'optocoupleur H11L1. Le driver TC4424 délivre suffisamment de courant pour piloter la grille du NMosFet (fig.7).

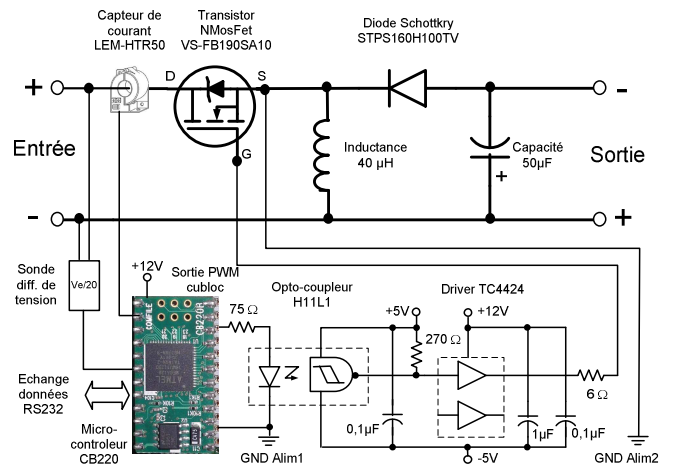


Fig.7 Schéma de la commande MPPT du hacheur inductif.

La sonde différentielle de tension divise par 20 la tension d'entrée Ve du buck-boost. L'intensité Ie absorbée par le convertisseur DC/DC est mesurée par le capteur à effet Hall LEM-HTR50 de dynamique maximale 50A. La sortie du micro-contrôleur Cubloc CB220 génère le signal MLI de rapport cyclique k calculé par le programme MPPT.



Fig.8 Carte électronique du buck-boost.

L'utilisation du logiciel Kicad (gratuit) a permis de réaliser le placement des composants et le circuit imprimé (fig.8).

5. VALIDATION DE LA STRATEGIE MPPT

Des essais de validation ont été réalisés dans la soufflerie du dépt. GIM de l'IUT de perpignan. La vitesse du vent en sortie de veine est pilotée par ordinateur et peut atteindre au maximum 55km/h.

L'éolienne à pales annulaires est soumise à une montée progressive, par paliers, de la vitesse du vent. La puissance Pe

et la résistance R_e mesurées en entrée du convertisseur DC/DC, pour plusieurs configurations, sont présentées :

- Sans MPPT, R_e fixe à $5,5\Omega$, 11Ω et 22Ω , (fig.9)
- Avec MPPT, $R_e = f(k)$ issue du programme (fig.10)

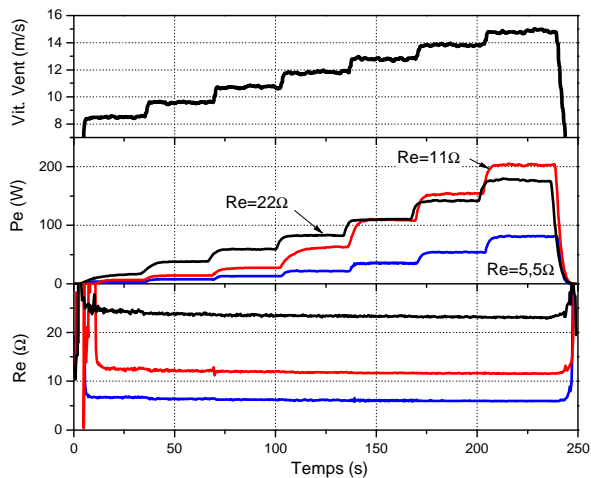


Fig.9 Sans MPPT : Puissance (milieu) et résistance (bas) à l'entrée du buck-boost pour le profil de vent mesuré (haut).

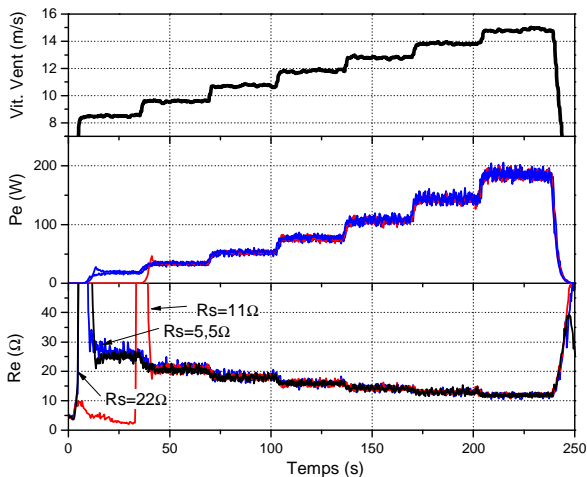


Fig.10 Avec MPPT : Puissance (milieu) et résistance (bas) à l'entrée du buck-boost pour le profil de vent mesuré (haut).

On remarque figure 9 que lorsque la charge est fixe alors la puissance récupérée n'est pas optimale. Une valeur de R_e élevée (22Ω) est plus adaptée aux vitesses de vents faibles, alors que $R_e=11\Omega$ maximalise la puissance aux vents forts et $R_e=5,5\Omega$ serait préférable aux vents très forts (voir $R_{e, opt}$ fig.1).

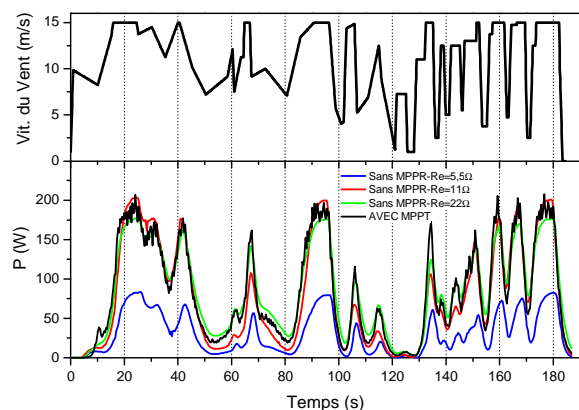


Fig.11 Profil de vent turbulent (haut). Puissance récupérée à l'entrée du convertisseur DC/DC pour plusieurs stratégies de commande (bas).

Quant à la figure 10, quelle que soit la vitesse du vent et la charge utilisateur R_s en sortie du buck-boost, l'algorithme MPPT présente, au redresseur, la résistance R_e la plus appropriée et optimise ainsi la puissance.

Lorsque maintenant, le profil de vent est turbulent (fig.11) l'utilisation du convertisseur avec recherche optimale de la puissance s'avère judicieuse. Dans tous les cas de figure, la puissance récupérée par le buck-boost est optimale.

On constate ce même phénomène sur les résultats obtenus lors du concours Gim'Eole2016 à Roanne (fig.12). La contribution du convertisseur DC/DC avec tracking de la puissance optimale entraîne un surplus d'énergie de plus de 40%.

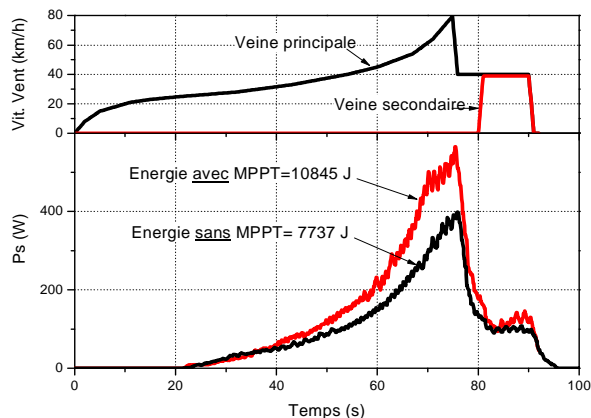


Fig.12 Puissance obtenue en sortie de convertisseur AVEC et SANS MPPT lors du concours Gim'Eole2016.

6. CONCLUSION

L'optimisation du transfert d'énergie d'une éolienne, est rendue possible par l'utilisation d'un convertisseur continu-continu de type buck-boost. Ce quadripôle, interposé entre l'éolienne et l'utilisateur, agit comme une « charge active ». Il présente en permanence à l'éolienne la charge idéale qui lui permet de fonctionner de manière optimale quelle que soit la vitesse du vent et la charge utilisateur.

Pour cela, par une simple mesure de la puissance à l'entrée du buck-boost, la stratégie de commande consiste à se rapprocher, par bonds successifs, de la courbe de puissance optimale déduite des caractéristiques de l'éolienne. Un algorithme de type « Perturbations et Observations » (P&O) est implanté dans le microcontrôleur qui calcule le rapport cyclique du signal MLI de commande du hacheur DC/DC.

Les mesures de puissance avec et sans MPPT pour des vents établis et turbulents et plusieurs charges utilisateur valident ce concept. Le gain d'énergie qu'apporte l'utilisation d'un tel système est de plus de 40%.

7. REFERENCES

- [1] Jacky BRESSON, Didier DUCLOS, Fabrice FRUGIER "Eolienne urbaine à pales annulaires" CONGRES NATIONAL DE LA RECHERCHE EN IUT - 8-9 juin 2016, NANTES.
- [2] Guy Séguier « L'électronique de puissance : Les fonctions de base et leurs principales applications » – Dunod p226.
- [3] Tahar Tafticht « Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien » Thèse Université du Québec à Trois-Rivières – déc. 2006.
- [4] Adam Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de l'INPT de Toulouse - avril 2005.
- [5] René AUBRÉE « Stratégies de commande sans capteur et de recherche de maximum de puissance pour les aérogénérateurs de petite puissance » Journées de Jeunes Chercheurs en Génie Electrique - St. Nazaire – 2013.