

Charge électronique de puissance DC programmable

Fabrice FRUGIER, Didier DUCLOS, Cécile DOLLÉ, Jacky BRESSON

IUT de Perpignan, département G.I.M.

Ch. de la Passio Vella, BP 79905 - 66962 PERPIGNAN Cédex 9

E.mail : fabrice.frugier@univ-perp.fr

Site internet : <http://gim.iut.univ-perp.fr>

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

RESUME – Une charge électronique est destinée à absorber un courant électrique. Cela permet de simuler une charge électrique dès lors que l'on souhaite tester un système quel qu'il soit ; batterie, alimentation, moteur, génératrice,... La plupart du temps ce banc de charge est constitué par des résistances de puissance connectées en série et/ou parallèle ce qui limite le nombre de possibilités et par conséquence le nombre de points de mesure.

Nous proposons l'utilisation d'un convertisseur DC-DC de type Buck-Boost qui, connecté sur une seule résistance bobinée de 4,7Ω de puissance 2KW, présente sur son entrée l'équivalent d'une résistance continûment variable depuis quelques milli-Ohms jusqu'à plusieurs kilo-Ohms. Cette charge active électronique commandée par un microcontrôleur permet de multiples configurations linéaires ou non linéaires.

Pour les applications les plus courantes, il est possible de fonctionner à U, I, R ou P constant. Pour d'autres applications plus spécifiques, par exemple dans l'éolien, il est conseillé de proposer une charge optimale dont le courant en fonction de la tension varie en racine carré ($U=k.I^{1/2}$).

Des mesures de puissance dans ces multiples configurations ont permis de valider le concept. Nous disposons ainsi d'une charge électronique de puissance 2kW dont la loi $U=f(I)$ peut changer en fonction de son utilisation.

Mots-clés – Charge électronique DC, charge linéaire et non-linéaire, convertisseur buck-boost, éolien-PV.

1. INTRODUCTION

Le département GIM de l'IUT de Perpignan participe, depuis 2008, au concours national Gim'Eole « les éoliennes urbaines ». L'objectif de ce concours est d'extraire avec une éolienne (à axe vertical ou horizontal) le plus d'énergie électrique du vent issu d'une soufflerie aéraulique. Pour cela les étudiants ont construit plusieurs types d'éoliennes¹ qu'ils

¹ Palmarès du dépt. GIM :

http://gim.iut.univ-perp.fr/projets_et_stages/gimeole.html

ont testés dans la soufflerie du département. La mesure de puissance nécessite l'utilisation d'un banc de charge résistif. Ce banc est constitué de 4 résistances de puissance (2kW) de 22Ω chacune que l'on dispose en série et/ou parallèle. Ce dispositif, de part sa constitution, ne permet que quelques combinaisons et la dynamique (de 5,5Ω à 88Ω) n'est pas suffisante pour des mesures de puissances élevées.

En s'appuyant sur les études de l'année dernière [1], nous proposons une charge électronique qui permet de simuler une charge ohmique continûment variable depuis quelques milli-Ohms jusqu'à plusieurs kilo-Ohms. Cela est rendu possible en considérant la résistance apparente d'entrée $Re=Ve/Ie$ d'un convertisseur DC-DC de type buck-boost chargé, en sortie, par une résistance fixe de puissance (Fig.1).

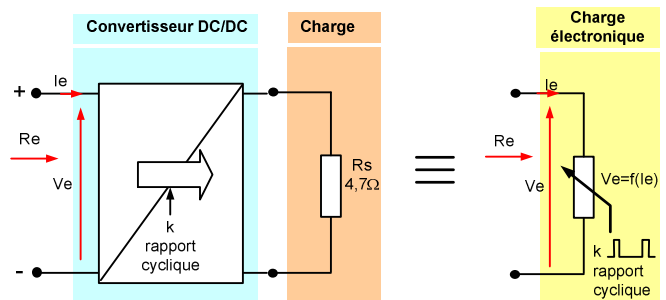


Fig.1 Synoptique de la charge électronique

La loi de variation de la tension Ve en fonction du courant Ie dans cette charge électronique virtuelle peut être linéaire ou non linéaire.

2. ETUDE THEORIQUE DE LA CHARGE ACTIVE.

Le montage du convertisseur buck-boost figure 2 est constitué d'un transistor NMosFet qui fait office d'interrupteur électronique (représenté par Q) rendu périodiquement conducteur par un signal rectangulaire de fréquence $1/T=22,8kHz$, de rapport cyclique k .

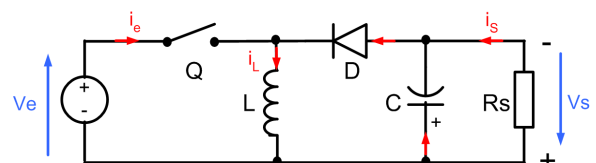


Fig.2 Schéma synoptique du buck-boost.

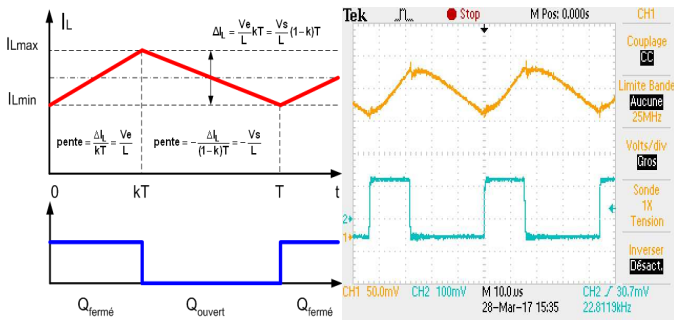


Fig.3 Chronogramme et oscillogramme du courant dans l'inductance.

En mode continu [2], c'est-à-dire lorsque le courant dans l'inductance ne s'annule jamais, deux phases sont à considérer sur la période T (fig. 3) :

- Q fermé dans l'intervalle $0 < t < kT$, la self L se charge linéairement à la tension V_e .

$$V_e = L \frac{di}{dt} \text{ soit } i_L = I_{L_{min}} + \frac{V_e}{L} t \quad (1)$$

Le courant évolue depuis la valeur $I_{L_{min}}$ à $I_{L_{max}}$ pour $t=kT$:

$$I_{L_{max}} = I_{L_{min}} + \frac{V_e}{L} kT \quad (2)$$

- Q ouvert dans l'intervalle $kT < t < T$, le courant dans l'inductance ne peut s'annuler brusquement et celle-ci transfère son énergie dans la capacité C à travers la diode D. La tension de sortie V_s devient alors négative :

$$V_s = -L \frac{di}{dt} \text{ soit } i_L = I_{L_{max}} - \frac{V_s}{L} (t - kT) \quad (3)$$

En fin de période $t=T$, le courant atteint la valeur $I_{L_{min}}$ soit :

$$I_{L_{min}} = I_{L_{max}} - \frac{V_s}{L} (1 - k)T \quad (4)$$

- La tension de sortie peut s'exprimer simplement en égalant les relations (2) et (4) :

$$\Delta I = I_{L_{max}} - I_{L_{min}} = \frac{V_s}{L} (1 - k)T = \frac{V_e}{L} kT \quad (5)$$

$$\text{Soit : } V_s = \frac{k}{1-k} V_e \quad (6)$$

Cette tension peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée, selon la valeur du rapport cyclique ($0 < k < 1$). 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 :

$$I_e = \frac{k}{1-k} I_s \rightarrow R_e = \frac{V_e}{I_e} = \left(\frac{1-k}{k} \right)^2 R_s \quad (7)$$

Ainsi, la résistance d'entrée R_e théorique du buck-boost évolue continuellement depuis quelques milli-Ohms à plusieurs kilo-Ohms en fonction de la variation du rapport cyclique k (fig.4).

Le convertisseur buck-boost fonctionne alors comme une charge active.

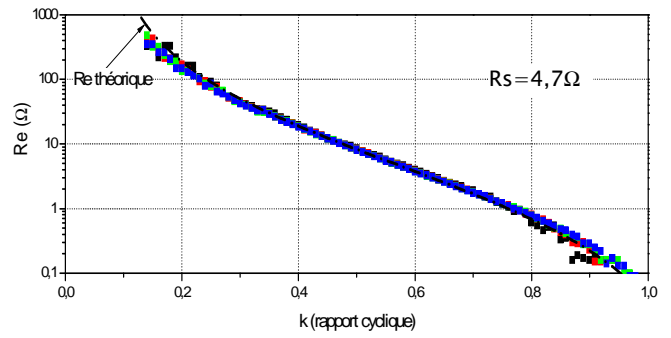


Fig.4 Comparaison de la résistance d'entrée du buck-boost pour plusieurs mesures avec la relation théorique.

3. SCHEMA ET CARTE ELECTRONIQUE

Le convertisseur DC-DC est chargé par la résistance bobinée de puissance de 4,7Ω. L'interface du transistor hacheur NMosFet est du type flottant et isolé galvaniquement du microcontrôleur par l'opto-coupleur H11L1. Le driver TC4424 délivre suffisamment de courant pour piloter la grille du NMosFet (fig.5).

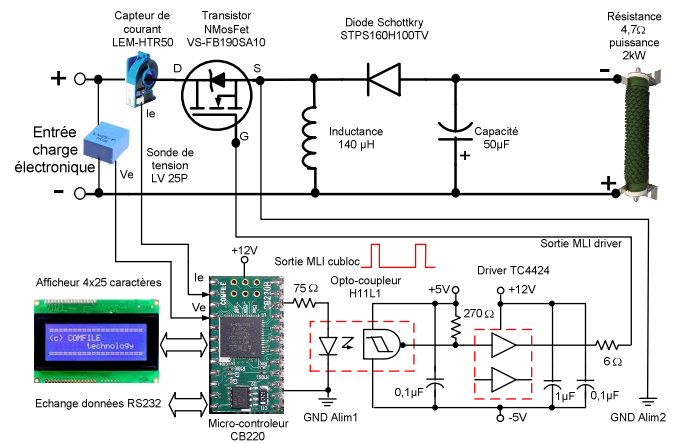


Fig.5 Schéma du buck-boost et de la commande MLI.

L'inductance comporte 33 spires de fil de cuivre (diamètre=2mm) bobinées sur un tore de ferrite ($\phi_{int}=23\text{mm}$; $\phi_{ext}=48\text{mm}$; section carré de $18 \times 12,5\text{mm}$). Le capteur de tension LV 25P, isolé galvaniquement, récupère la tension d'entrée V_e du buck-boost. L'intensité I_e absorbée par la charge est mesurée par le capteur à effet Hall LEM-HTR50 de dynamique maximale 50A. Ces informations tension et courant d'entrées sont transmises au microcontrôleur Cubloc CB220 qui génère le signal MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) de rapport cyclique k calculé par le programme approprié.

Ce microcontrôleur utilise un langage simple le BASIC et sa capacité mémoire permet l'implantation de plusieurs programmes :

- **pour les applications les plus courantes** : programme à R_e , U_e , I_e ou P_e constant avec possibilité de faire un balayage par exemple de R_e pour relever la caractéristique d'un système (photovoltaïque, batterie, génératrice,...)
- **pour des applications spécifiques** : possibilité d'obtenir une loi $V_e = f(I_e)$ quelconque. Par exemple dans l'éolien, pour optimiser l'énergie récupérée par une éolienne, on démontre [1] que le courant dans la charge doit suivre la loi $V_e = K \sqrt{I_e}$ où K dépend du couple rotor-génératrice.

L'afficheur LCD de 4x25 caractères et deux boutons poussoirs assurent l'interactivité avec le microcontrôleur. Il est possible ainsi de choisir le programme et les divers paramètres.

L'utilisation du logiciel Kicad (gratuit) a permis de réaliser le placement des composants et le circuit imprimé (fig.6).

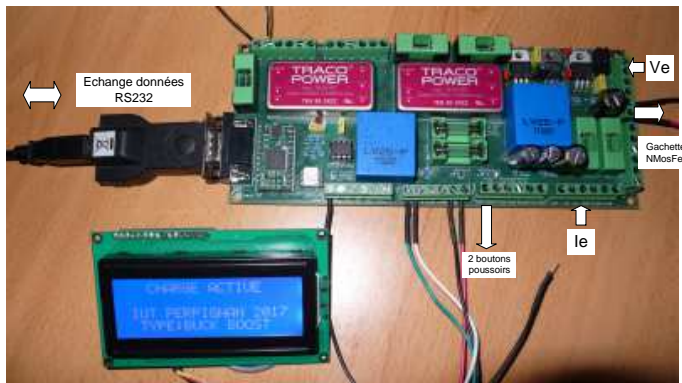


Fig.6 Carte électronique de la charge électronique.

4. VALIDATION DE LA CHARGE ELECTRONIQUE

Les diverses mesures réalisées (fig.4) ont permis de comparer la variation de la résistance d'entrée R_e de la charge électronique en fonction du rapport cyclique k avec la courbe théorique (équ.7). L'écart minime entre les deux courbes correspond au rendement $\eta_{bb}=0,89$ du convertisseur DC/DC.

A l'inverse d'un banc de charge résistif, la charge électronique pilotée par microcontrôleur permet une certaine souplesse quant à la loi de variation entre le courant I_e et la tension V_e . Pour valider cela, plusieurs types de mesures sont envisagés.

4.1. Relevé de caractéristiques - Eolien - PV

La mesure de la caractéristique de puissance d'un système (éolienne, panneau photovoltaïque,...) nécessite de faire débiter le système sur une résistance variable depuis zéro jusqu'à l'infini, c'est-à-dire sur la charge électronique.

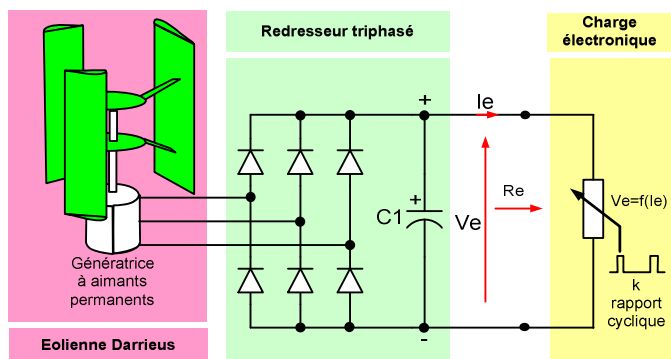


Fig.7 Eolienne DARRIEUS débitant sur la charge électronique de puissance.

Pour plusieurs vitesses de vent, la puissance de l'éolienne DARRIEUS à axe vertical (D=80cm, H=80cm) est relevée par balayage de la résistance virtuelle d'entrée de la charge active depuis $0,1\Omega$ à 1000Ω (fig.7). Les caractéristiques optimales sont obtenues à vitesses variables (fig.8) et répertoriées dans le tableau 1.

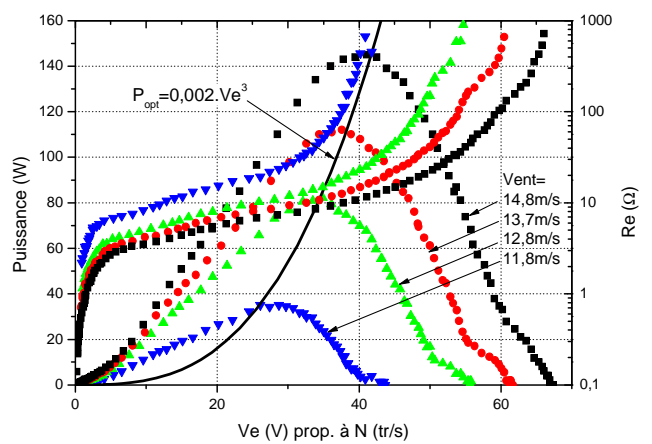


Fig.8 Caractéristique de puissance de l'éolienne DARRIEUS pour plusieurs vitesses de vent.

Tab.1 Caractéristiques optimales de l'éolienne DARRIEUS déduites de la fig.8.

Vent (m/s)	11,8	12,8	13,7	14,8
U_e (V)	21,6	34,9	37,7	41,1
N (tr/s)	7,4	9,4	10	10,9
P_{e_opt} (W)	35,1	82,2	112	145
R_{e_opt} (Ω)	19,4	14,8	12,5	11,6

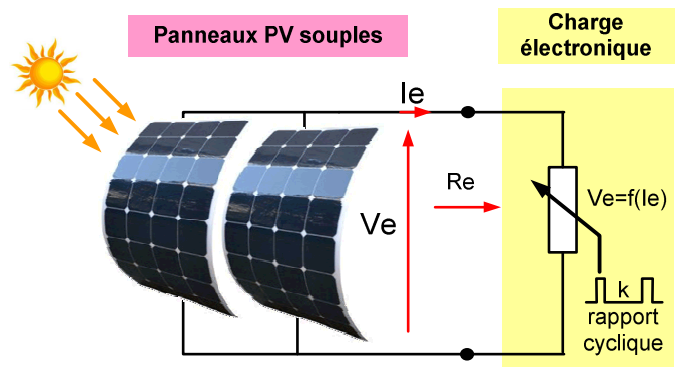


Fig.9 Panneaux PV débitant sur la charge active.

Il est procédé de même avec deux panneaux photovoltaïques (100Wp de 12V chacun) monocristallins souples connectés en parallèle (fig.9). Pour un ensoleillement donné, la puissance maximale de 151W ($U=15,1V$, $I=10A$) est obtenue lorsque le panneau photovoltaïque débite sur une résistance optimale de $1,51\Omega$ (fig.10).

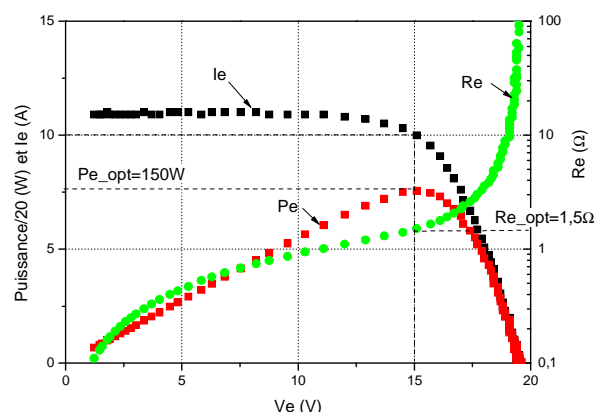


Fig.10 Caractéristique courant/tension et puissance d'un panneau photovoltaïque.

4.2. Fonctionnement à $V_e=constante$.

L'utilisation de la charge électronique à $V_e=Constante$ permet de simuler l'équivalent d'une batterie et ainsi de tester le comportement d'un système (éolienne, PV,...) débitant (ou chargeant) sur une batterie virtuelle.

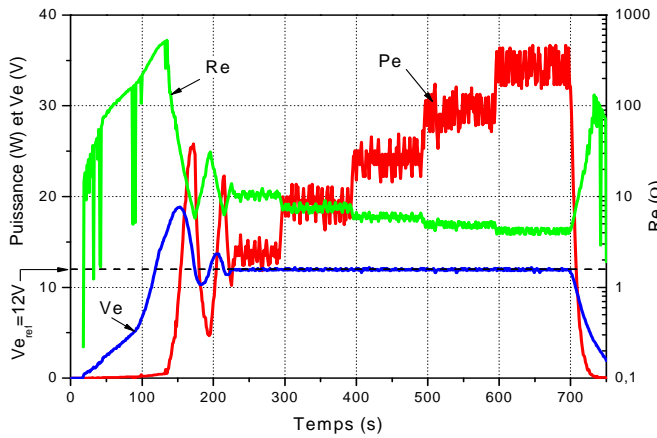


Fig.11 Evolution de la puissance P_e , de la tension V_e et de la charge R_e pour plusieurs vitesses de vent.

Toujours dans le cas de notre éolienne DARRIEUS et pour un vent évoluant depuis zéro jusqu'à 15m/s en 5 paliers, on remarque (fig.11) :

- Un phénomène transitoire sur les 200 premières secondes, inhérent au démarrage de l'éolienne,
- Puis une stabilisation de la puissance à chaque palier de vitesses de vent,
- A chaque changement de palier, la charge active R_e réagit rapidement pour maintenir V_e constant à 12V.

Ce fonctionnement à $V_e=Constante$ c'est-à-dire à vitesse de rotation constante « bride » l'éolienne ne permettant pas ainsi d'extraire la puissance maximale. Un fonctionnement optimal serait de charger l'éolienne par une charge adaptée.

4.3. Fonctionnement non-linéaire à $V_e = K\sqrt{I_e}$.

On sait que pour obtenir la puissance maximale en sortie d'une éolienne, il faut fonctionner à vitesse variable. C'est-à-dire présenter une charge optimale dont le courant et la tension évoluent en $V_e = K\sqrt{I_e}$. Le paramètre K dépend du couple rotor-génératrice et est déduit de la caractéristique de puissance de l'éolienne [1].

A partir de la caractéristique de l'éolienne (fig.8) nous déterminons le coefficient $K_{opt}^{Ve} = 0,002$ correspondant au lieu des puissances maximales.

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

$$\text{Soit : } I_e = K_{opt}^{Ve} V_e^2 \text{ ou bien } V_e = \sqrt{\frac{I_e}{K_{opt}^{Ve}}} = K\sqrt{I_e} \quad (8)$$

$$\text{Avec : } K = \frac{1}{\sqrt{K_{opt}^{Ve}}} = 22,4$$

Les relevés de la tension en fonction du courant pour ce type de programme, font apparaître (fig.12) une variation non-linéaire de la charge active conforme à la loi $V_e = 22,4\sqrt{I_e}$.

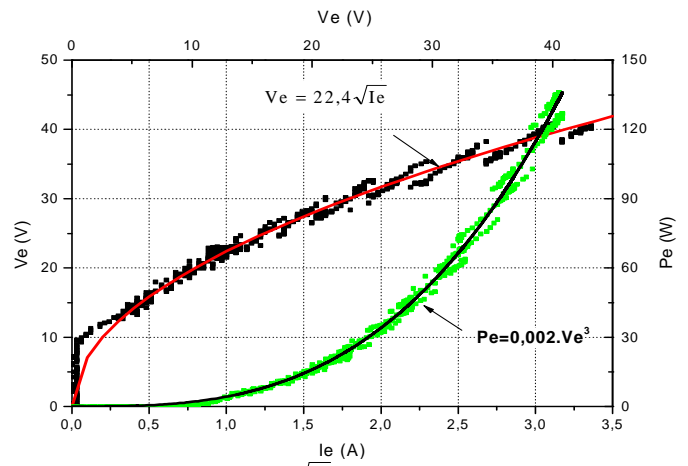


Fig.12 Charge adaptée en $V_e = K\sqrt{I_e}$ pour $K=22,4$

Ainsi, pour les vitesses de rotation faibles (V_e faible) la résistance de charge (pente de la courbe \rightarrow verticale) est grande laissant l'éolienne, peu chargée, prendre de la vitesse. A mesure que la vitesse de rotation augmente (V_e grand), la résistance de charge diminue (pente de la courbe \rightarrow horizontale) l'éolienne est de plus en plus chargée. A tout moment, la charge est adaptée à la vitesse de rotation et la puissance récupérée est optimale.

Ce fonctionnement est plus rapide qu'une recherche de maximum de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) mais nécessite la connaissance des caractéristiques du générateur.

5. CONCLUSION

Pour les besoins du concours GimEole sur les éoliennes urbaines, nous avons développé une charge électronique pour relever la puissance électrique de nos réalisations. Cette charge virtuelle s'articule autour d'un convertisseur DC-DC de type buck-boost chargé par une résistance de puissance. L'ensemble, vu de l'entrée, peut être considéré comme une résistance dont la valeur ne dépend plus que du rapport cyclique k du signal MLI issu du microcontrôleur qui pilote le convertisseur. Cette charge électronique présente une grande dynamique continue de quelques milli-Ohms à plusieurs kilo-Ohms.

Elle peut fonctionner linéairement à U , I , R ou P constant de manière statique ou dynamique pour, par exemple, relever la caractéristique tension-courant d'une éolienne, d'un panneau photovoltaïque, d'une batterie, d'une alimentation continue,....

Pour certaines applications non-linéaires, cette charge virtuelle peut s'adapter au fonctionnement du générateur (éolienne, panneau photovoltaïque,...) pour optimiser le transfert d'énergie.

Il est possible, moyennant un programme adapté de transformer la charge électronique en un système MPPT, rendant ainsi la charge indépendante du système à mesurer.

6. REFERENCES

- [1] Jacky BRESSON, Didier DUCLOS, Fabrice FRUGIER " Optimisation du transfert d'énergie d'une éolienne par convertisseur buck-boost " CONGRES NATIONAL DE LA RECHERCHE EN IUT - 8-9 juin 2016, NANTES.
- [2] Joël Redoutey « Alimentations à découpage - Conception des Systèmes Automatisés »- Centrale Marseille, p51, 2012.