

Conception d'un banc d'essais d'émulateur éolien équipant un générateur électrique de petite puissance

Tarek Zine-Eddine BENHACINE, Ali DALI, Abdelhamid KAABECHE et Madjid TATA

Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, BP 62 Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, 16340, Algérie

RESUME -Dans ce travail, les auteurs présentent un émulateur éolien à petite échelle basé sur un moteur asynchrone et un variateur de vitesse. Les performances aérodynamiques et la méthode de calcul du coefficient de puissance de la turbine éolienne sont déterminées avec le programme PropID. Le mode opératoire du banc d'essai est expliqué à l'aide des équations et des schémas synoptiques. Les résultats théoriques sont comparés à ceux issus des relevés expérimentaux.

Mots-clés—Emulateur éolien, Variateur de vitesse, API, Simulateur HIL, Energies renouvelables.

1. INTRODUCTION

Au cours des dernières années, la conception préliminaire et les tests de systèmes de contrôle industriels modernes ont été basés sur l'utilisation des techniques de simulation hardware-in-the-loop (HIL). Un simulateur HIL consiste essentiellement en une connexion en boucle fermée de parties physiques et logicielles, visant à reproduire le comportement dynamique d'un processus industriel dans un environnement contrôlable. Le concept HIL a prouvé son efficacité dans le prototypage rapide et à faible coût. En raison du développement rapide des logiciels et des dispositifs de traitement de l'information en temps réel, la base technologique des systèmes HIL s'est développée plus que sa conceptualisation [1].

Les systèmes électriques sont un domaine intéressant où les simulateurs HIL peuvent être utilisés, à partir duquel la conversion des énergies renouvelables est actuellement un domaine d'investigation riche, particulièrement adapté à l'utilisation de ce type de simulateurs. En raison de la diversité des différentes ressources énergétiques, il est difficile et coûteux d'avoir accès, au même temps, aux différents générateurs d'énergie dans les laboratoires de recherche où ces études doivent être menées. Une façon de surmonter ces limitations consiste à utiliser des simulateurs HIL [2-6]. De nombreux travaux sont réalisés pour émuler différents générateurs à base d'énergie renouvelable tels que l'éolien et l'hydro-cinétique [7-8] ou ceux à base de groupe diesel [9-10].

Par ailleurs, la technologie des petites turbines éoliennes n'est pas encore mature comparativement au stade de développement actuel relatif aux grandes éoliennes. Ainsi, pour améliorer leurs performances, des recherches approfondies sont menées sur les éoliennes équipées d'un générateur électrique de petite puissance [11] où de nombreuses topologies de banc d'essai d'émulateur éolien ont été proposées dans la littérature [12-22]. Cependant, par rapport à ces différentes topologies de banc d'essai, le banc d'essai développé dans ce papier présente l'avantage d'avoir un bon rapport qualité-prix. De plus, le

modèle de la turbine éolienne est issu du programme PropID qui est un code de calcul dédié pour l'analyse des performances des éoliennes.

L'objectif de ce papier consiste à détailler les étapes nécessaires à la simulation physique en temps réel d'un système éolien permettant l'étude des performances des éoliennes équipant un générateur électrique de petite puissance. Le banc d'essai l'émulateur de turbine éolienne (ETE) développé est équipé d'un générateur à aimants permanents soumis à des conditions de vent simulées. L'étude menée à travers le banc d'essai a permis de déterminer les performances de l'éolienne émulée pour des conditions de fonctionnement de vitesses de rotation et de vitesses de vent variables.

2. MODELE DE LA TURBINE EOLIENNE

La puissance mécanique extraite de l'éolienne s'exprime selon (1), où ρ est la masse volumique de l'air en kg.m^{-3} , S la surface balayée par la turbine en m^2 , v la vitesse du vent en m.s^{-1} et C_p , le coefficient de puissance qui lie la puissance extractible de l'éolienne à la vitesse du vent.

$$P_{\text{extractible}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \cdot C_p \quad (1)$$

Le coefficient de puissance C_p est une fonction non linéaire de λ dont l'expression est donnée par (2) et de l'angle de calage des pales β caractérisant le comportement aérodynamique des pales du rotor. Cette courbe est spécifique à chaque éolienne.

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_t}{V_v} \quad (2)$$

Avec : R : rayon de la pale, ω_t : vitesse angulaire de la turbine et V_v : vitesse du vent.

D'autre part, afin de simuler le comportement de la turbine éolienne, il est nécessaire de déterminer le couple que cette dernière exerce sur l'arbre mécanique. Le couple aérodynamique est calculé comme suit :

$$C_{\text{aéro}} = \frac{P_{\text{extractible}}}{\omega_t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^2 \cdot R \cdot \frac{C_p}{\lambda} \quad (3)$$

2.1. Choix de la turbine éolienne

Le choix de l'éolienne qui sera émulée à travers le banc d'essai est basé sur un calcul effectué avec le programme PropID.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la détermination de la courbe de variation de C_p en fonction de λ pour le cas de l'éolienne Whisper100 produite par Southwest Windpower [23]. La Whisper 100 a une puissance de sortie nominale

d'environ 900 W pour une vitesse de vent de 12.5 mètres par seconde et une vitesse de rotation nominale de 1000 tr/min ; C'est la puissance maximale que peut générer l'éolienne dans des conditions de vent optimales. Le diamètre du rotor est d'environ 2,1 mètres. La vitesse de vent minimale requise pour que la turbine commence à produire de l'énergie est d'environ 3.4 mètres par seconde alors que la vitesse du vent maximale à laquelle la turbine s'arrête pour des raisons de sécurité est d'environ 55 mètres par seconde.

Le rotor de l'éolienne Whisper100 est constitué de trois pales avec le profil aérodynamique fx63_137 [24]. Le Tableau 1. représente la géométrie de la pale de l'éolienne Whisper 100. Les coefficients de portance et de traînée pour les différents angles d'attaque et pour les différents nombres Reynolds sont calculés par le programme open source 'Xfoil' développé par le laboratoire NREL.

Tableau 1. Géométrie de la pale de l'éolienne Whisper 100

Rayon [m]	Corde [m]	$\theta_T [^\circ]$
0,22	0,140	14,61
0,29	0,124	11,8
0,36	0,104	9,05
0,43	0,088	6,37
0,50	0,076	4,71
0,57	0,067	3,23
0,64	0,060	2,4
0,71	0,054	1,59
0,78	0,049	1,08
0,84	0,045	1,07
0,91	0,041	1,06
0,98	0,038	1,05
1,05	0,034	1

2.2. Résultats obtenus par PropID

Le code de calcul PropID, basé sur la théorie de l'élément de pale pour l'étude des performances des éoliennes [25], utilise la géométrie de la pale de l'éolienne pour calculer la courbe de puissance spécifique de l'éolienne. Ainsi, les données du Tableau 1. Ainsi que les caractéristiques aérodynamiques du profil de la pale sont introduit dans le programme PropID. Les résultats sont illustrés dans les Figs. 1 et 2. La Fig.1. représente la courbe de puissance spécifique de l'éolienne Whisper 100. Le lambda optimum de cette éolienne est de 5,7 correspondant à un coefficient de puissance de 0,42. La Fig.2. représente la puissance mécanique développée par le rotor de l'éolienne whisper 100 pour différentes vitesses de rotation du rotor et pour différentes vitesses de vent. Ces courbes permet de tracer la courbe de la charge mécanique en reliant les points de fonctionnement optimum pour chaque vitesse de vent.

La courbe de variation du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ montrée sur la Fig. 1. est modélisée par l'expression polynomiale suivante :

$$C_p = p_1 \lambda^4 + p_2 \lambda^3 + p_3 \lambda^2 + p_4 \lambda + p_5 \quad (4)$$

$$p_1=0.1348, p_2=-0.02965, p_3=0.2005, p_4=-0.3958, p_5= 0.233.$$

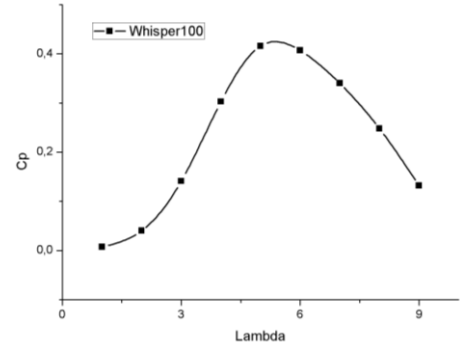


Fig. 1. Coefficient de puissance spécifique

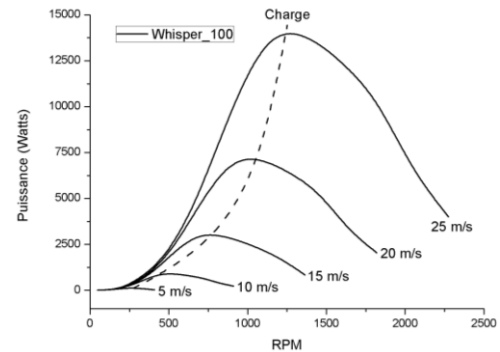


Fig. 2. Puissance mécanique au niveau du rotor en fonction des différentes vitesses de rotation et pour différentes vitesses de de vent

3. PRESENTATION DU BANC D'ESSAIS DE L'ETE

La base de L'ETE est un moteur asynchrone triphasé (1.1 kW / 1500 tr/min) alimenté par un variateur de vitesse de la marque Schneider Electric (ATV 71) [26] qui est piloté via une interface de programmation d'application (API) de la marque Schneider Electric (Modicon M221) [27]. Grâce à l'utilisation du variateur de vitesse, le moteur asynchrone peut fonctionner à de faibles vitesses tout en fournissant des couples importants.

Par ailleurs, l'ETE est accouplé à une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) (1 kW / 500 tr/min) dont le fonctionnement en générateur permet de convertir l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique. En outre, des batteries d'accumulateur sont branchées sur la sortie du MSAP à travers un redresseur (pont à diodes) et un convertisseur DC-DC à MLI abaisseur de tension (hacheur buck). Ce dernier permet de faire varier la vitesse de rotation du générateur au moyen du contrôle du rapport cyclique du signal MLI envoyé au convertisseur. Le schéma synoptique et la photo du dispositif du banc d'essais expérimental sont représentés sur les Figs. 3 et 4 respectivement.

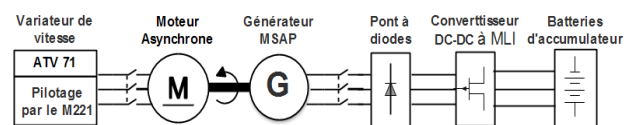
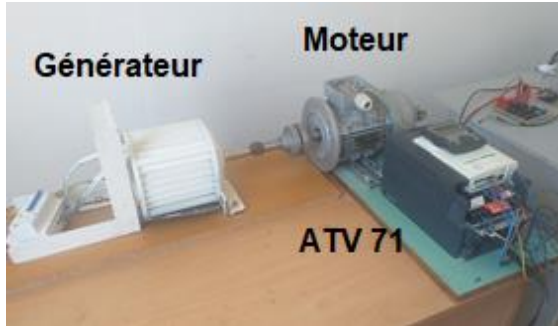


Fig. 3. Schéma synoptique du banc d'essais expérimental



a)



b)

Fig. 4. Photo du banc d'essais expérimental : a) Système de contrôle et batteries, b) Système moteur-générateur

3.1. Mode opératoire

La simulation des conditions de vent est rendu possible grâce au contrôle de couple du moteur. La démarche à suivre consiste à calculer le couple de référence qui sera développé par le moteur. Pour cela, le modèle de la turbine éolienne doit être implémenté dans l'API. Ainsi, pour des valeurs données de la vitesse de vent et le rayon et en prenant en considération les équations (1), (2) et (4), l'API calcule la valeur du couple aérodynamique à l'aide de l'équation (3). Par la suite, l'API envoie les signaux de commande et de consigne au variateur à travers le bus RS-485 selon le protocole de communication Modbus RTU afin que le moteur développe le couple de référence. Il est à noter que la vitesse de rotation et le couple mécanique au niveau de l'arbre de transmission sont estimés avec le variateur de vitesse. La récupération de toutes de ces données par l'API se fasse aussi selon le protocole de communication Modbus. Le schéma de la Fig. 5. décrit les étapes de simulation des conditions de vent à travers le banc d'essais expérimental étudié.

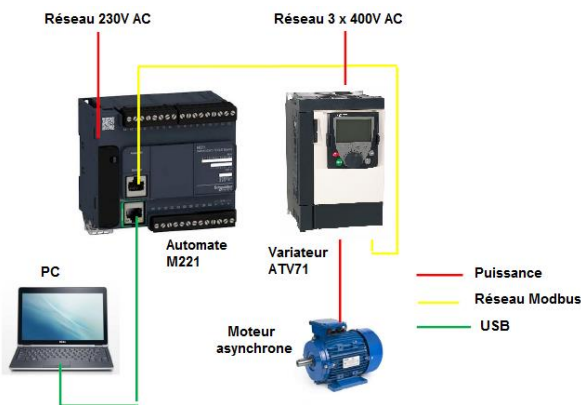


Fig. 5. Schéma synoptique du mode opératoire

3.2. Contrôle de couple

Selon la configuration du variateur, le moteur peut commuter entre un fonctionnement en régulation de vitesse et un fonctionnement en contrôle de couple. Toutefois, pour la simulation des conditions de vent, le contrôle de couple est nécessaire. En contrôle de couple, la vitesse peut varier à l'intérieur d'une "bande morte" configurable. Lorsqu'elle atteint la limite inférieure ou supérieure, le variateur repasse automatiquement en régulation de vitesse (repli) et reste à cette vitesse limite. Le couple réglé n'est donc plus maintenu. En outre, pour protéger le moteur, une limitation de courant et/ou de couple peut être aussi configurée (Fig.6).

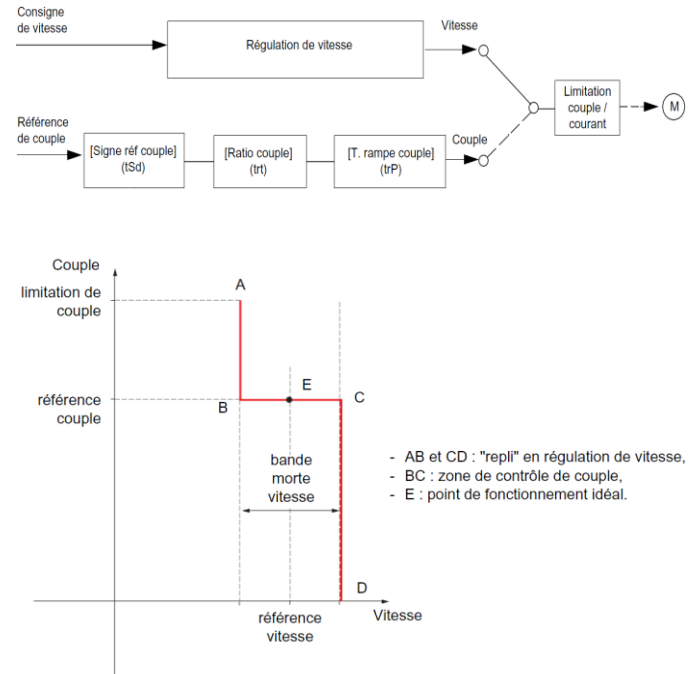


Fig. 6. Fonctionnement en contrôle de couple

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la détermination des performances de l'éolienne Whisper100 pour des conditions de fonctionnement de vitesses de rotation et de vitesses de vent variables. Pour cela, la courbe de variation de C_p en fonction de λ modélisée à l'aide de l'expression polynomiale (4) est introduite dans l'API. Le reste des étapes nécessaires à la simulation physique en temps réel d'un système éolien sont décrites dans la sous-section précédente.

La Fig.7. présente les résultats issus des relevés expérimentaux et les résultats théoriques obtenus à l'aide de la simulation du modèle de l'éolienne Whisper100. Ces résultats sont obtenus pour cinq valeurs de la vitesse de vent (V_w) : 5 m/s, 6 m/s et 6.5 m/s, 7 m/s et 7.5 m/s. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les résultats théoriques et ceux obtenus expérimentalement.

La vitesse de rotation est maintenue entre 250 tr/min et 420 tr/min. Cette plage de variation de la vitesse de rotation permet d'avoir des points de fonctionnement proches des conditions nominales du moteur et de l'hacheur utilisés dans les essais. Il est à noter que ces essais peuvent être réalisés à des vitesses en dehors de plage de variation précédente [250 tr/min - 420 tr/min]. Cependant, les grandeurs nominales du moteur et de l'hacheur doivent être respectées.

Dans ces essais, la tension d'entrée de l'hacheur qui représente l'image de la vitesse est régulée à travers le contrôle du rapport cyclique de l'hacheur. D'autre part, le courant d'entrée de l'hacheur qui représente l'image du couple varie selon le point de fonctionnement. En effet, le courant n'est pas régulé dans le présent essai. L'introduction d'une boucle de régulation de courant conduit au suivi et à l'extraction de la puissance maximale de la turbine. Cependant, cette partie n'est pas traitée dans le présent travail.

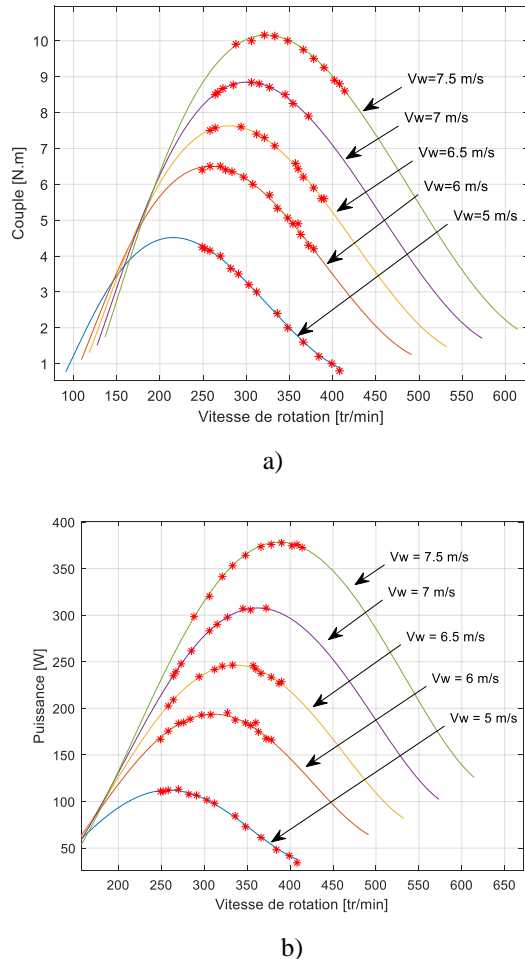


Fig.7. Résultats de la validation expérimentale : a) Couple, b) Puissance

5. CONCLUSIONS

Ce papier décrit les étapes nécessaires au montage d'un banc d'essai qui permet d'émuler le comportement d'une turbine éolienne réelle. Le banc d'essai développé est constitué essentiellement d'un moteur asynchrone triphasé commandé par un variateur de vitesse, un générateur MSAP et une API. Le premier objectif qui consiste à la validation de conception d'un émulateur de turbine éolienne étant atteint. La prochaine étape consiste à effectuer des tests approfondis pour la détermination des performances du générateur MSAP et tester des algorithmes qui permettent d'avoir un fonctionnement de la turbine en mode MPPT.

L'originalité du travail proposé réside dans l'utilisation du code de calcul PropID. A travers le choix d'une éolienne ayant des pales avec un profil spécifique, ce code de calcul permet de reproduire de manière fiable les performances de l'éolienne qui sera émulée avec le banc d'essai. Cette technique peut être introduite par exemple dans la démarche de conception de nouvelles éoliennes.

Enfin, le montage d'un tel banc d'essai dans un laboratoire destiné aux essais pratiques au profit des étudiants peut être très bénéfique pour ceux qui suivent un cursus de formation dans le domaine de l'entraînement électrique en général ou la conversion de l'énergie éolienne en particulier.

6. REFERENCES

- [1] Munteanu, I., A. I. Bratcu, et al. "Hardware-in-the-Loop-based Simulator for a Class of Variable-speed Wind Energy Conversion Systems: Design and Performance Assessment." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 25(2): 564-576 (2010).
- [2] Akbarian, H., P. Pillay, et al. (2015). Design of a power electronic emulator for parallel operation of renewable energy resources in microgrids. 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC).
- [3] Glover, S., J. Neely, et al. (2012). Secure Scalable Microgrid Test Bed at Sandia National Laboratories. 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER).
- [4] Jabbar, A. A., A. Y. Elrayyah, et al. (2019). Development of Hybrid AC/DC Laboratory-scale Smart Microgrid Testbed with Control & Monitoring System Implementation in LabVIEW. 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia).
- [5] Restrepo-Zambrano, J. A., J. M. Ramírez-Scarpetta, et al. (2016). "Experimental framework for laboratory scale microgrids." *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*: 9-23.
- [6] Vasquez-Plaza, J. D., J. Tenorio, et al. (2020). Control of Parallel Connected Voltage Source Inverters in a Microgrid for Experimental Testing. 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe).
- [7] Neely, J. C., K. M. Ruehl, et al. (2013). Electromechanical emulation of hydrokinetic generators for renewable energy research. 2013 OCEANS - San Diego.
- [8] Neely, J., S. Glover, et al. (2012). Wind turbine emulation for intelligent microgrid development. 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER).
- [9] Neely, J. C., S. Pekarek, et al. (2012). An economical diesel engine emulator for micro-grid research. International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
- [10] Erlinghagen, P., M. Knaak, et al. (2017). Development of a modular CHP test stand for the analysis of the dynamic behaviour of small synchronous generators. *CIREP - Open Access Proceedings Journal* 2017, 1695-1698.
- [11] David Wood, *Small Wind Turbines Analysis, Design and Application*. Green Energy and Technology. Springer. 2011.
- [12] P. Satish Kumar, R.P.S. Chandrasena, K. Victor Sam Moses Babu, "Design and implementation of wind turbine emulator using FPGA for stand-alone applications", Vol 43, 2022 – No. 1.
- [13] G. Vijay Kumar, and S. Sharma. "Hardware implementation of wind turbine emulator and its integration with utility grid." *Journal of Electrical Systems* 3 (2022).
- [14] Moussa, I., Bouallegue, A. and Khedher, A. (2019), New wind turbine emulator based on DC machine: hardware implementation using FPGA board for an open-loop operation. *IET Circuits Devices Syst.*, 13: 896-902.
- [15] Eldahab, YE Abu, Naggat H. Saad, and Abdalhalim Zekry. "Assessing wind energy conversion systems based on newly developed wind turbine emulator." *International Journal of Smart Grid-ijSmartGrid* 4.4 (2020).
- [16] Lahfaoui, B., S. Zouggat, et al. (2017). "Real Time Study of P&O MPPT Control for Small Wind PMSG Turbine Systems Using Arduino Microcontroller." *Energy Procedia* 111: 1000-1009.
- [17] Benzaouia, S., M. Mokhtari, et al. (2021). "Design and implementation details of a low cost sensorless emulator for variable speed wind turbines." *Sustainable Energy, Grids and Networks* 26: 100431.
- [18] Sahoo, N. C., A. S. Satpathy, et al. (2013). "D.C. Motor-Based Wind Turbine Emulator Using LabVIEW for Wind Energy Conversion System Laboratory Setup." *International Journal of Electrical Engineering & Education* 50(2): 111-126.
- [19] Dekali, Z., L. Baghli, et al. (2019). Experimental Emulation of a Small Wind Turbine Under Operating Modes Using DC Motor. 2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA).

- [20] Sokolovs, A., L. Grigans, et al. (2014). "An Induction Motor Based Wind Turbine Emulator." *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* 51(2): 11-21.
- [21] Saudemont, C., Leclercq, L., Robyns, B., et al. (2004). Développement d'un émulateur temps réel d'un système de génération éolienne associé à un stockage inertiel d'énergie : *L'électrotechnique du futur*, Num 11, pp 49-59.
- [22] Lambert, A., Kelner, V. (2016). Conception d'un banc d'essai pour génératrice d'éolienne de petite puissance. *Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels* n°30.
- [23] <https://www.technosun.com/descargas/SOUTHWEST-WHISPER-100-manual-EN.pdf>
- [24] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx63137-il>
- [25] <https://m-selig.ae.illinois.edu/propid.html>.
- [26] <https://www.se.com/fr/fr/product/ATV71HD11M3X460/atv71-240v-11kw/>
- [27] <https://www.se.com/fr/fr/product/TM221CE40T/modicon-m221-contr%C3%B4leur-40e-s-pnp-port-ethernet+s%C3%A9rie-24vcc/>