



Experimental investigation on a wind turbine integrated in a wind accelerator

Rym CHAKER¹, Mouldi KARDOUS¹, Sassi BEN NASRALLAH²

1- Centre des Recherches et des Technologies de l'Energie Technopole Borj Cedria B.P N°95 2050 - Hammam Lif - Tunisie

2- Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir – Avenue Ibn El Jazzar, 5019 Monastir, Tunisie
rym.chaker@gmail.com; mouldi.kardous@crten.rnrt.tn; sassi.bennasrallah@enim.rnu.tn

Résumé : Une des solutions pour valoriser les vents faibles, est la technique des accélérateurs du vent (dites aussi diffuseurs). Ce travail représente une étude de l'accroissement de l'énergie éolienne induite par l'association d'une éolienne et d'un accélérateur de vent. Pour y parvenir, des expérimentations en soufflerie du CRTEn ont été réalisées, pour comparer la production du modèle réduit d'éolienne fonctionnant en mode conventionnel à celle de la même éolienne mais intégrée dans un diffuseur. Les résultats obtenus montrent que lorsqu'elle est intégrée dans un diffuseur, l'éolienne démarre à une vitesse plus faible comparativement avec l'éolienne conventionnelle. Concrètement, cela signifie que l'éolienne associée à un accélérateur de vent entre en production bien avant l'éolienne conventionnelle ce qui permet de valoriser des vents faibles où l'éolienne ordinaire est incapable de produire. Il a été prouvé aussi qu'on peut récupérer trois fois plus de puissance de la même éolienne si on l'intègre dans un diffuseur.

Mots clés :

Accélérateur du vent, éolienne, expérimentale, soufflerie.

1. Introduction:

La consommation croissante et continue des ressources énergétiques fossiles entraîne aujourd'hui des dysfonctionnements d'ordre économique et environnemental sérieux. Suite à ces problèmes, plusieurs pays se sont orientés vers la recherche d'une énergie saine et propre, ce qui a abouti au développement des énergies renouvelables. En particulier, l'énergie éolienne extraite directement du vent. L'attention à cette source d'énergie est de plus en plus importante en Tunisie, malgré qu'elle soit un pays moyennement venté.

Pour remédier au problème de vents faibles, plusieurs solutions sont proposées dont on peut citer la technique de l'accélération du vent. En effet, l'énergie éolienne étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Il en résulte qu'un accroissement de la vitesse du vent peut générer un important accroissement de la puissance fournie par les éoliennes. Le dispositif permettant cette accélération est dit « accélérateur de vent » ou « diffuseur ».

Il s'agit en fait d'une conduite creuse constitué d'un divergent de forme tronconique avec une section d'admission légèrement incurvée et dispose d'un flasque à sa section de sortie. Il abrite une éolienne de petite puissance pour améliorer ses performances (Figure 1).

C'est depuis plus de 50 ans que les recherches sur ce dispositif ont été entamées [1-3]. Mais comparés aux énergies fossiles moins chères et hautement commercialisées, les énergies renouvelables se sont retrouvées exclues du marché mondial. Et c'est dans les années 90 que les difficultés des années 1980 commencent enfin à s'estomper d'où plusieurs autres chercheurs ont fixé à nouveau leur attention sur plusieurs types de diffuseur parmi lesquels [4-10] et ce sont ces recherches-là qui ont aboutis aux résultats intéressants.

Ce travail s'intègre dans ce cadre. Il s'agit en fait d'une étude expérimentale sur l'accroissement de l'énergie éolienne induite par l'association d'une éolienne et d'un modèle d'accélérateur de vent et qui s'est déroulé dans la soufflerie du Centre des Recherches et des Technologies de l'Environnement.

2. Dispositif étudié

Le modèle réduit du diffuseur testé au cours des expérimentations dans la soufflerie de la *CRTE_n* est fabriqué en tôle galvanisée d'épaisseur 2 mm. Ses caractéristiques géométriques sont mentionnées dans le tableau suivant:

Tableau 1: Caractéristiques géométriques du modèle réduit de diffuseur

L (mm)	H (mm)	D _{inc} (mm)	L (mm)	D _a (mm)	D _s (mm)	θ (°)
341	71	215	33	194	326	11

Le diffuseur est muni d'un support métallique vertical très mince lui permettant d'être fixé rigidement au centre de la veine de la soufflerie sans provoquer aucune perturbation de l'écoulement de l'air.



Figure 1 : Modèles réduits des dispositifs étudiés : Diffuseur et éolienne

Le modèle réduit de l'éolienne testée est composé d'un mât, d'un moyeu auquel sont fixées trois pales. Le rotor de l'éolienne de diamètre 20 mm est monté au sommet d'un mât de hauteur 306 mm. Les pales ont un profil de type S827, chacune d'elles est de longueur 96 mm.

Les différentes expérimentations ont été réalisées à la soufflerie du Centre des Recherches et des Technologies de l'Energie de Borj Cedria (*CRTE_n*) (Figure 2). Elle est de longueur 14.60 mètres et de largeur 4.80 mètres.

La vitesse du vent varie de 0 à 30m/s selon la vitesse de rotation du ventilateur y installé.

La veine d'essai est rectangulaire de longueur 4,95 m et de section 1,00x0,80 m². C'est là où se déroulent les expérimentations. Les parois latérales de la veine sont en verre (transparentes) pour faciliter la visualisation de l'expérience et l'écoulement de l'air.

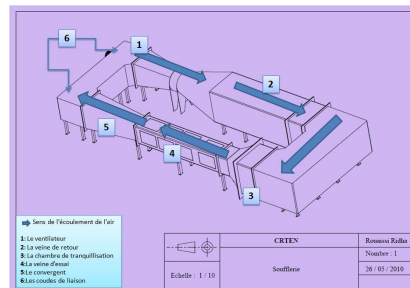


Figure 2 : Schéma de la soufflerie du *CRTE_n*

3. Déroulement des expériences :

Pour estimer les performances de l'accélérateur de vent, il suffit de comparer la vitesse du vent au plan de rotation de l'éolienne fonctionnant en mode conventionnel (sans diffuseur) à celle de la même éolienne mais intégrée dans un diffuseur. D'ordinaire, la mesure de la vitesse du vent peut se faire grâce à deux techniques :

L'instrument de mesure classique tel qu'un tube de Pitot (figure 3-a) ou la technique PIV (Partical Image Velocimetry) qui se base sur l'interprétation de photographies des particules en mouvement et éclairées par un plan laser.

Ces deux techniques sont inadaptées dans nos essais et sont impossibles à mettre en œuvre. En effet la rotation des pales rend la mesure de la vitesse du vent au plan de l'éolienne avec un tube de Pitot irréalisable. Quant à la technique PIV, elle est aussi impossible à cause de la nature opaque du diffuseur.

C'est pour cette raison qu'on a dû chercher une méthode indirecte pour la mesure de cette vitesse. L'approche proposée et qui a été réalisée en plusieurs étapes est la suivante :

1. On a placé l'éolienne dans la veine d'essai pour mesurer sa vitesse de rotation pour différentes vitesses de flux libre par l'intermédiaire d'un stroboscope (Figure 3-b).
 2. On a tracé la courbe de variation de la vitesse de rotation en fonction de celle de flux libre et on a cherché à étudier la possibilité de trouver une expression qui lie ces deux vitesses.
 3. Enfin, on a placé l'éolienne au niveau de la section d'admission du diffuseur et on a mesuré, avec le stroboscope, la vitesse de rotation de l'éolienne
 4. On a utilisé par la suite l'expression établit au point 2 (voir ci-dessus) pour remonter à la vitesse du vent au plan de rotation de l'éolienne lorsqu'elle est placée à l'intérieur du diffuseur.
- On souligne toutefois que dans cette démarche adoptée, on a supposé que dans l'absolue l'éolienne réagit de la même façon qu'elle soit placée à l'intérieur du diffuseur ou utilisée en mode conventionnel. Autrement dit pour la même éolienne, la même vitesse du vent donne toujours la même vitesse de rotation de l'éolienne.

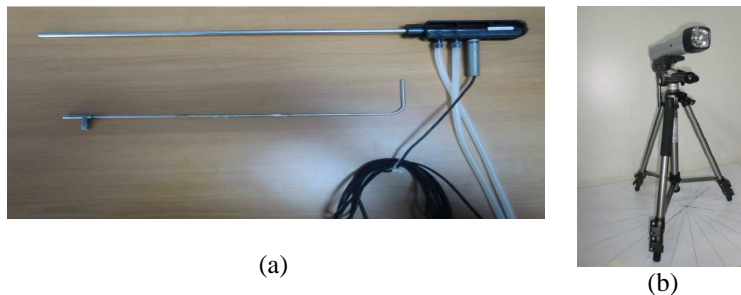


Figure 3 : (a) Tube de Pitot ; (b) Stroboscope

4. Résultats et interprétations

4.1. Effet d'un diffuseur sur la vitesse de rotation d'une éolienne

La figure 4 représente la variation de la vitesse de la rotation de l'éolienne expérimentée en fonction de la vitesse de flux libre. Elle montre que pour les mêmes conditions de vent, la vitesse de rotation, de la même éolienne, est manifestement plus forte lorsque celle-ci est placée dans la section d'admission du diffuseur (w_{DAWT}) que lorsqu'elle est utilisée en mode conventionnel (w_{EC}). Ceci prouve nettement qu'une éolienne est plus performante lorsqu'elle est intégrée dans un diffuseur. Il faut noter, également, que l'éolienne intégrée dans un diffuseur démarre à une vitesse du flux libre plus faible que si elle est utilisée en mode conventionnel (1,6 m/s pour l'accélérateur de vent contre 2,6 m/s pour l'éolienne conventionnelle).

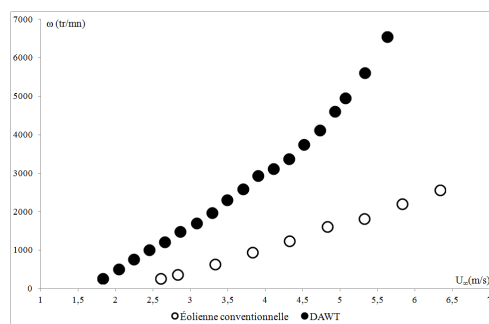


Figure 4 : Vitesse de rotation de l'éolienne en fonction de la vitesse du flux : Eolienne conventionnelle et d'un DAWT (expérimentale)

Le rapport entre les deux vitesses de rotation ($R_{rot} = \frac{w_{DAWT}}{w_{EC}}$) est très important (de l'ordre de 4,04) au voisinage de la vitesse de démarrage de l'éolienne conventionnelle, pour se stabiliser par la suite, autour d'un rapport moyen égal à 2,8 (Figure 5). Il est normal que R_{rot} soit plus fort au voisinage de la vitesse de démarrage de l'éolienne puisque pour cette vitesse l'éolienne est en phase transitoire de fonctionnement (passage de l'état au repos à l'état mis en mouvement), par contre l'éolienne intégrée dans le diffuseur a dépassé cette phase transitoire.

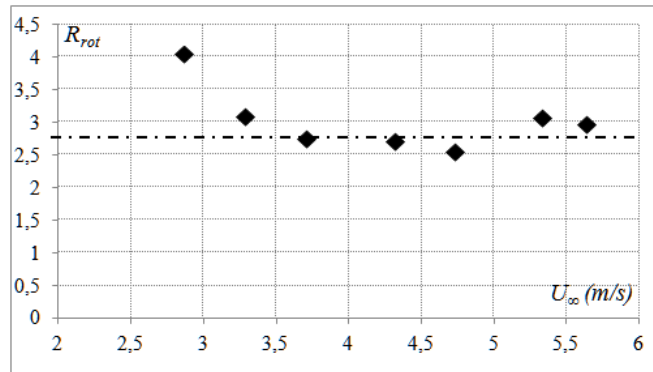


Figure 5 : Variation du rapport (R_{rot}) en fonction de (U_{∞}) (expérimental)

4.2. Accélération du vent à l'aide d'un diffuseur

Par ailleurs, puisque dans l'absolu, pour la même éolienne, les mêmes conditions de vitesse du flux libre donnent la même vitesse de rotation de l'éolienne. On peut recalculer les vitesses du flux nécessaires pour que l'éolienne conventionnelle tourne aux mêmes vitesses de rotation que l'éolienne intégrée dans un diffuseur.

La figure 6 représente la variation de la vitesse de rotation de l'éolienne conventionnelle en fonction de la vitesse au plan de rotation. Cette figure a été obtenue en se limitant aux mesures expérimentales de la vitesse du vent qui correspondent aux conditions de fonctionnement normal de l'éolienne (vitesse du vent comprise entre 4 m/s et 8 m/s)

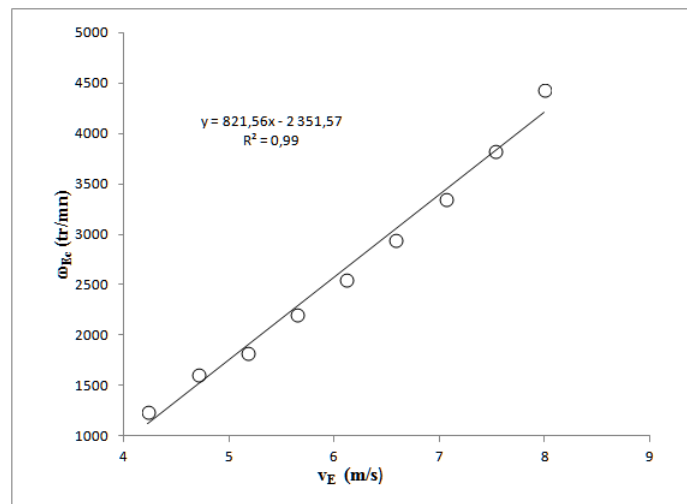


Figure 6 : la vitesse de rotation de l'éolienne conventionnelle en fonction de la vitesse au plan de rotation.

On obtient alors l'expression suivante:

$$v_E = \frac{\omega_{Ec} + 2351,57}{821,56} \quad (1)$$

Cette expression a été utilisée pour déterminer la vitesse au plan de rotation de l'éolienne intégrée dans un diffuseur et les résultats obtenus sont illustrés par la figure 7.

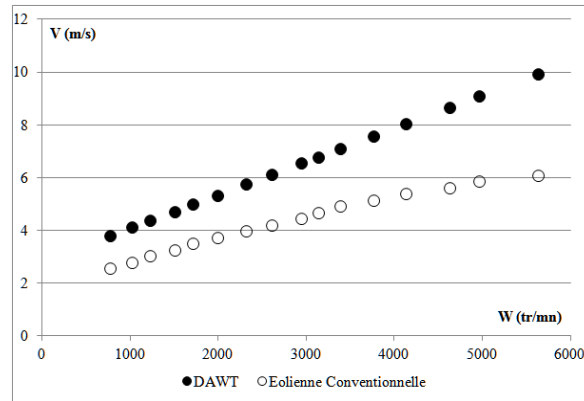


Figure 7 : Comparaison entre la courbe de la vitesse de vent en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne conventionnelle tournant à la même vitesse que celle intégrée au diffuseur et la courbe de la vitesse du vent en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne conventionnelle.

On définit alors le rapport ($R_{Ec/DAWT}$) comme étant le rapport entre la vitesse du flux responsable de la vitesse de rotation de l'éolienne conventionnelle lorsqu'elle tourne à la même vitesse que l'éolienne intégrée dans le diffuseur (v_{DAWT}) d'une part et la vitesse du flux responsable de la vitesse de rotation de l'éolienne conventionnelle (v_{Ec}) d'autre part. Il est donné par l'expression suivante :

$$R_{Ec/DAWT} = \frac{v_{DAWT}}{v_{Ec}} \quad (2)$$

Pour le calcul de ce rapport, seulement les données expérimentales des vitesses du vent produisant à peu près les mêmes vitesses de rotation de l'éolienne conventionnelle et du DAWT, ont été considérées. Au total 12 cas très représentatifs, ont été identifiés, ils couvrent une gamme de vitesses du flux libre entre 2,82 et 5,41 m/s. La figure 7 représente la variation du rapport ($R_{Ec/DAWT}$) en fonction de la vitesse de flux libre (U_∞). En dehors des zones transitoires de démarrage de l'éolienne, ce rapport est presque constant, il est égal en moyenne à 1,40.

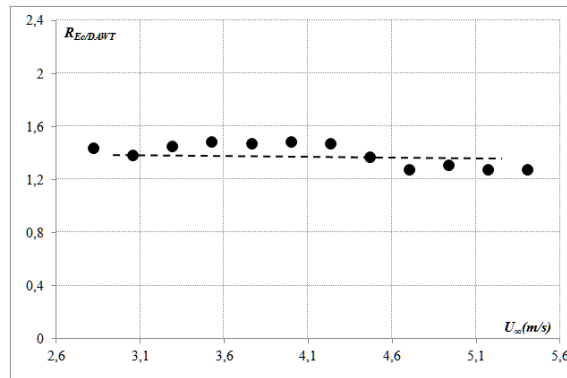


Figure 7 : Variation du rapport ($R_{Ec/DAWT}$) en fonction de (U_∞) (expérimental)

Or comme il est connu la puissance d'une éolienne est donnée par l'expression suivante :

$$P_{u(E)} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot v_E^3 \quad (3)$$

Dans notre cas, puisque la même éolienne a été utilisée que ce soit en mode conventionnel ou en mode intégrée dans le diffuseur, en conséquence elle a le même coefficient de puissance C_p . Pour ces deux modes de fonctionnement, la puissance de l'éolienne est donnée respectivement par les équations (4) et (5).

$$P_{u(Ec)} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot v_{Ec}^3 \quad (4)$$

$$P_{u(DAWT)} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot v_{DAWT}^3 \quad (5)$$

On définit alors le rapport de puissance ($P_{Ec/DAWT}$) comme étant le rapport entre la puissance produite par l'éolienne intégrée dans le diffuseur sur la puissance produite par l'éolienne conventionnelle (Expression

$P_{Ec/DAWT} = \frac{P_{DAWT}}{P_{Ec}} = \left[\frac{v_{DAWT}}{v_{Ec}} \right]^3$ (6)). Ce rapport peut fournir une idée sur l'accroissement de la puissance résultant de l'association éolienne-diffuseur.

$$P_{Ec/DAWT} = \frac{P_{DAWT}}{P_{Ec}} = \left[\frac{v_{DAWT}}{v_{Ec}} \right]^3 \quad (6)$$

Pour la plage de vitesses du flux libre correspondant au fonctionnement normal de l'éolienne, le rapport ($P_{Ec/DAWT}$) a été trouvé égal à **3,05**. Cela signifie qu'on peut récupérer trois fois plus de puissance de la même éolienne si on l'intègre dans un diffuseur. Autrement dit, **une éolienne intégrée dans un diffuseur équivaut à trois éoliennes conventionnelles**. Si on rajoute à cela que l'éolienne intégrée dans un diffuseur démarre et donc commence à produire à partir de vitesses de flux libre inférieures à celles de l'éolienne conventionnelle, elle peut produire encore plus de puissance.

Conclusion

La technique des accélérateurs du vents est considéré parmi les solutions les plus répondu pour valoriser les vents faibles. Ce travail expérimental représente une étude de l'accroissement de l'énergie éolienne induite par l'association d'une éolienne et d'un accélérateur de vent. Les résultats ainsi obtenus montrent que:

- L'éolienne conventionnelle démarre à une vitesse de la soufflerie égale à 1100 tr/mn (soit une vitesse du vent égale 2.6 m/s). Aussi la vitesse de rotation de l'éolienne croît linéairement avec la vitesse du vent.
- l'éolienne intégrée dans l'accélérateur de vent se comporte de la même manière que l'éolienne conventionnelle avec des différences notables en termes de valeurs de vitesses de rotation.
- Lorsqu'elle est intégrée dans un diffuseur, l'éolienne démarre à une vitesse plus faible comparativement avec l'éolienne conventionnelle. Cette vitesse est égale à 900 tr/mn (soit 1.8 m/s).
- Le rapport entre ces deux vitesses est 1.44. Concrètement, cela signifie que l'éolienne associée à un accélérateur de vent entre en production bien avant l'éolienne conventionnelle ce qui permet de valoriser des vents faibles où l'éolienne ordinaire est incapable de produire.
- Un rapport de puissance P_{Ec}/E_{dif} (puissance produite par l'éolienne intégrée dans le diffuseur sur la puissance produite par l'éolienne conventionnelle) ainsi déduit semble être une preuve mathématique qui montre qu'on peut récupérer trois fois plus de puissance de la même éolienne si on l'intègre dans un diffuseur. Pour la plage de vitesses du flux libre correspondant au fonctionnement normal de l'éolienne, le rapport P_{Ec}/E_{dif} a été trouvé égal à 3.05.

Nomenclature

C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne, (-)	P	Rapport de puissance, (-)
D	Diamètre du diffuseur, m	P_u	Puissance produite par l'éolienne, w
L	Longueur du diffuseur, m	R	Rapport, (-)
		V	Vitesse de vent au plan de rotation, m/s

Symboles grecs

α Angle d'ouverture, °

ω Vitesse de rotation, *tr/min*

Références

Exposant, Indices

DAWT Eolienne intégrée dans un diffuseur

Ec Eolienne conventionnelle

- [1] G. M. Lilley and W. J. Rainbird, "A preliminary report on the design and performance of a ducted windmill," p. 73, 1956.
- [2] O. Igra, "Compact shrouds for wind turbines" *Energy Convers.*, vol. 16, no. 4, pp. 149–157, 1977.
- [3] R. A. Oman, K. M. Foreman, and B. L. Gilbert, "Investigation of Diffuser-Augmented Wind Turbines, Part I," vol. 2, no. Grumman Research Dept Report RE-534, ERDA Report C00–2616–2, p. 118, 1977.
- [4] T. Matsushima, S. Takagi, and S. Muroyama, "Characteristics of a highly efficient propeller type small wind turbine with a diffuser," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 9, pp. 1343–1354, 2006.
- [5] A. Adeel, M. Zaidi, and N. Uddin, "Numerical Investigations of Subsonic Flow through a Convergent-Divergent Duct with varying Flange Heights at Exit," in *Proceeding of International Conference on Energy and Sustainability*, 2013, pp. 15–19.
- [6] Y. Ohya, T. Karasudani, A. Sakurai, K. ichi Abe, and M. Inoue, "Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 96, no. 5, pp. 524–539, 2008.
- [7] K. Toshimitsu, K. Nishikawa, W. Haruki, S. Oono, M. Takao, and Y. Ohya, "PIV measurements of flows around the wind turbines with a flanged-diffuser shroud," *J. Therm. Sci.*, vol. 17, no. 4, pp. 375–380, 2008.
- [8] A. T. J. Mozafari, "Numerical Modeling of Tidal Turbines : Methodology Development and Potential Physical Environmental Effects," p. 158, 2010.
- [9] M. Kardous, R. Chaker, F. Aloui, and S. Ben Nasrallah, "On the dependence of an empty flanged diffuser performance on flange height: Numerical simulations and PIV visualizations," *Renew. Energy*, vol. 56, pp. 123–128, 2013.
- [10] R. Chaker, M. Kardous, M. Chouchen, F. Aloui, S. Ben Nasrallah, "Vortices characteristics to explain the flange height effects on the aerodynamic performances", *Solar Energy Engineering*, Vol. 138, N°6, 2016.

25-27 Octobre 2017

Monastir - Tunisie