

BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI
Publicat de
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
Tomul LVII (LXI), Fasc. 5, 2011
Secția
ELECTROTEHNICĂ. ENERGETICĂ. ELECTRONICĂ

ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE ÉOLIENNE À AXE HORIZONTAL ET ÉOLIENNE À AXE VERTICAL

PAR

NASR SARAH et MOUBAYED NAZIH*

Université Libanaise, Faculté de Génie 1, Tripoli, Liban

Reçu: 8 novembre 2011

Accepté pour publication: 10 décembre 2011

Résumé. L'énergie éolienne, considérée comme source non polluante, est une des options les plus durables parmi les possibilités futures. En fait, les capteurs éoliens sont classés par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. De cette manière, il existe des capteurs à axe horizontal et des capteurs à axe vertical. Au début de cet article, une représentation de chaque type de capteur est traitée à part. Ensuite, une étude comparative entre ces deux types est discutée. Enfin, une conclusion est formulée.

Mots clés: énergie renouvelable; énergie éolienne; caractéristique d'éolienne; éolienne à axe horizontal; éolienne à axe vertical; bruit, coût et rendement.

1. Introduction

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement (Fyrippis *et al.*, 2008). En fait, à cause de la masse et de la vitesse de l'air en mouvement, le vent possède une énergie cinétique. Tout en ralentissant cette masse d'air à l'aide d'un dispositif quelconque et en l'amenant

* Auteur à adresser la correspondance: *e-mail*: nmoubayed@yahoo.com

à l'arrêt complet, une énergie cinétique est récupérée. C'est justement le rôle d'une turbine éolienne de capter cette énergie mécanique et de la transformer en énergie électrique par la génératrice couplée à l'arbre de la turbine (Multon *et al.*, 2003).

L'énergie éolienne, qui est une partie de l'énergie renouvelable, est une énergie non polluante. Elle constitue un supplément intéressant à l'énergie de base fournie par les centrales thermiques et nucléaires. La consommation d'énergie a montré que la part des énergies renouvelables dans la production mondiale de l'énergie est de 18% seulement, dont 1,8% est produite à partir des éoliennes (Multon, 2003), mais ce secteur est en plein essor. À noter que les coûts de fabrication, d'installation et d'exploitation des éoliennes sont rapidement rentabilisés. L'énergie éolienne possède deux secteurs d'utilisation à savoir

a) L'éolien urbain: tournant à très basse vitesse, totalement silencieuses, de dimensions réduites, elles sont prévues pour être implantées en toiture de bâtiment et sont parfois appelées *éoliennes urbaines* (Laverdure *et al.*, 2004; Multon, 2003).

b) L'éolien offshore: il s'agit d'éoliennes installées dans la mer. Ce type d'installation présente des solutions aux nuisances esthétiques et sonores. Aussi, dans ce cas les éoliennes sont installées dans des secteurs disposant d'un vent beaucoup plus constant qu'à terre. Ce secteur permet le développement technique progressif d'éoliennes de très grande puissance (Fyrrippis *et al.*, 2008).

Il existe deux types d'éoliennes: l'éolienne à axe horizontal et l'éolienne à axe vertical. Cet article traite la différence entre ces deux types d'éoliennes. Pour cela, la section 2 présente le principe de fonctionnement, les catégories et les caractéristiques d'une éolienne à axe horizontal. Ceux d'une éolienne à axe vertical sont discutés dans la section 3. La section 4 étudie, à titre d'exemple, deux éoliennes de même puissance, l'une à axe horizontal et l'autre à axe vertical, et cela afin d'illustrer la comparaison entre elles et trouver les critères de choix de chaque type d'éolienne. Dans la section 5, une conclusion est donnée.

2. Éolienne à axe horizontal

2.1. Principe de fonctionnement

Les éoliennes à axe horizontal ont été inspirées des moulins à vent. Elles sont généralement formées de deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des turbines hydrauliques: la puissance mécanique du vent fait tourner des pales reliées directement ou *via* un multiplicateur de vitesse à un alternateur (Poitiers, 2003). Ce dernier produit de l'électricité. Une éolienne est formée de trois

parties principales : le rotor, la nacelle et la tour (Fig. 1) (El-Aimani, 2002). Les éoliennes à axe horizontal peuvent fonctionner en « amont » ou en « aval ». Pour les éoliennes qui fonctionnent en amont, le vent frappe les pales directement. Il s'ensuit qu'elles doivent être rigides pour pouvoir résister au vent. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000 kW fonctionnent avec ce principe. Pour les éoliennes fonctionnant en aval, le vent frappe sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes (Fig. 2).



Fig. 1 – Eolienne à axe horizontal.

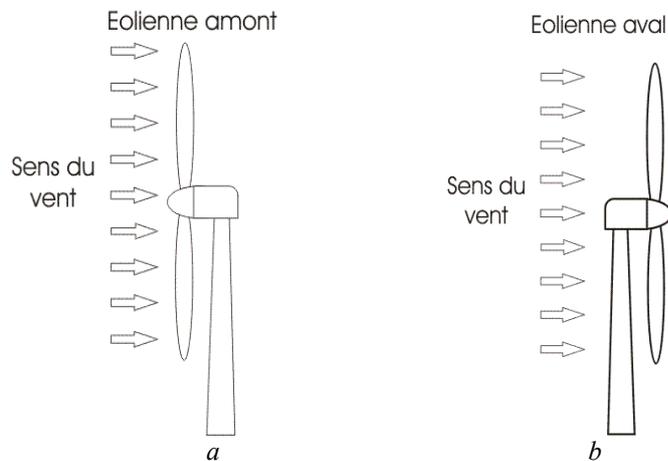


Fig. 2 – Fonctionnement des éoliennes en amont (a) et en aval (b).

2.2. Catégories des éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal se divisent en deux catégories: industrielles et domestiques (Multon, 1999).

Les éoliennes industrielles produisent plus d'énergie et donc elles sont les plus chères. Elles sont réservées à des applications de forte puissance. Leur

mât possède une hauteur de 50 à 120 m et un diamètre de 4 à 6 m. Ceci nécessite des fondations très puissantes pour soutenir l'ensemble. La hauteur totale d'une éolienne industrielle est de 25 à 180 m. Sa puissance varie entre 100 kW et 5 MW. À noter que les éoliennes qui produisent une puissance comprise entre 15 kW et 60 kW sont dites *éoliennes semi-commerciales*. Leur mât est compris entre 12 et 30 m.

Concernant les éoliennes domestiques, celles-ci sont encore appelées *petites éoliennes* dont la puissance est comprise entre 100 W et 20 kW. Leur mât ne dépasse pas 12 m. Vu leur taille relativement petite, elles peuvent être installées dans les zones urbaines. En plus la nuisance sonore est quasi nulle.

Le Tableau 1 illustre la distribution de puissance pour chaque catégorie.

Tableau 1
Distribution de puissance des éoliennes selon leur catégorie

Éoliennes commerciales kW	Éoliennes industrielles kW	Éoliennes domestiques W
15	100	100
20	200	200
30	300	300
50	500	400
60	600	600
	750	750
	1 000	1 000
	1 500	2 000
	2 000	3 000
	3 000	5 000
	4 000	10 000
	4 500	20 000
	5 000	

2.3. Courbe de puissance et zones de fonctionnement

Il est très important de noter que l'éolienne ne peut pas fonctionner quelle que soit la vitesse du vent. Il existe une vitesse minimale pour son démarrage et une vitesse maximale au-delà de laquelle la turbine risque de s'endommager. En fait, l'éolienne possède quatre zones de fonctionnement (Fig. 3) (El-Ali, 2010)

a) Zone I: quand la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage minimum – la turbine est arrêtée.

b) Zone II: dans cette zone, la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

c) Zone III: à partir de la vitesse nominale, la puissance est maintenue constante avec des méthodes mécaniques de limitation de vitesse de la turbine.

d) Zone IV: une fois la vitesse maximum atteinte il est dangereux de laisser l'éolienne tourner, des systèmes de freinage mécanique, souvent un frein à disque, sont activés pour arrêter complètement la turbine.

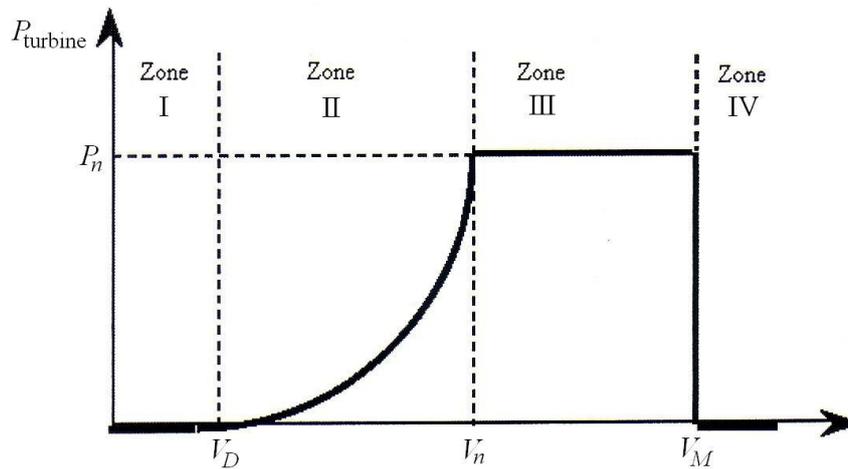


Fig. 3 – Courbe de puissance et zones de fonctionnement d'une éolienne.

2.4. Technologies d'aérogénérateurs

Il y a plusieurs technologies d'aérogénérateurs, elles diffèrent selon le choix de la génératrice et le mode de commande. Parmi les plus importantes on peut citer les suivantes:

- a) la machine à courant continu;
- b) la machine asynchrone à cage fonctionnant à vitesse fixe;
- c) la machine asynchrone à cage fonctionnant à vitesse variable;
- d) la machine asynchrone à double alimentation;
- e) la machine synchrone à aimants.

2.5. Puissance d'une éolienne

L'expression de la puissance générée par une éolienne est donnée par la relation (Wildi & Sybille)

$$P_m = C_p \frac{\rho A}{2} V^3, \quad (1)$$

avec: P_m – la puissance mécanique de la turbine, [W]; C_p – coefficient de performance de la turbine (sans unités); ρ – densité de l'air, [kg/m^3]; A – région balayée par la turbine, [m^2]; V – vitesse de l'air, [m/s].

Pour une turbine donnée, et comme les deux paramètres ρ et A sont des constantes, la valeur de la puissance générée dépend du coefficient de

performance, C_p , et de la vitesse de l'air, V . Pour maximiser cette puissance, et comme la vitesse du vent est variable, le coefficient de performance doit être maximisé, donc contrôlé. En fait, l'expression de ce coefficient est de la forme (Poitiers, 2003)

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda, \quad (2)$$

avec: λ – le rapport de la vitesse de pointe de la pale de l'éolienne par rapport à la vitesse de l'air; β – l'angle de position (pitch angle), [degrés]; où λ_i est défini par la relation (Poitiers, 2003)

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

et pour (Mitchell *et al.*, 2005)

$$C_1 = 0,5176; \quad C_2 = 116; \quad C_3 = 0,4; \quad C_4 = 5; \quad C_5 = 21; \quad C_6 = 0.0068.$$

La Fig. 4 représente les résultats de simulation de la variation de C_p vs. λ et cela pour plusieurs valeurs de β . Ce coefficient prend une valeur maximale égale à 0,48, et cela pour $\lambda = 8,1$ et $\beta = 0^\circ$.

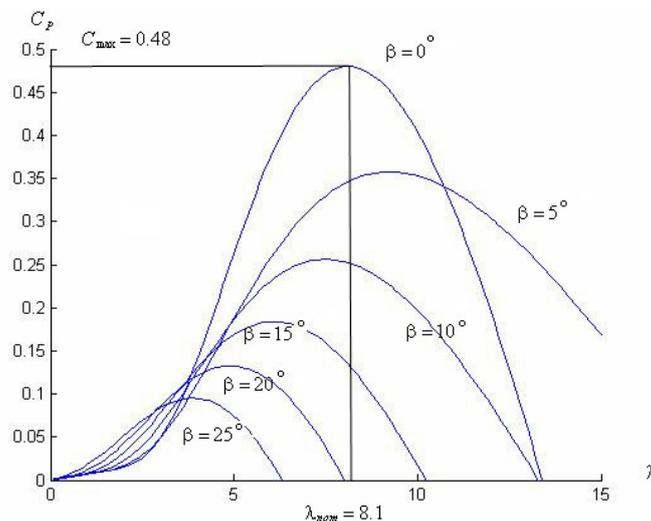


Fig. 4 – Variation de C_p vs. λ et β .

En général, si λ est inférieur à 3, alors l'éolienne est lente. Sinon elle est considérée comme rapide. À noter que pour de grandes valeurs de λ , des problèmes de stabilité et de bruit apparaissent (El-Ali, 2010).

2.6. Bruit et vibrations

Bien que les éoliennes de première génération étaient nuisibles du point de vue sonore, il semble aujourd'hui que les avancées technologiques ont permis de réduire considérablement le bruit engendré par ces machines. En effet, sur une échelle de bruit, l'éolienne se situe entre le bruit d'un vent léger et le bruit de l'intérieur d'une habitation, soit environ 45 dB (Fig. 5). L'évolution du niveau sonore en fonction du nombre d'éoliennes est logarithmique, c'est-à-dire que l'installation d'une deuxième éolienne augmente le niveau sonore de 3 dB au lieu de le doubler (Fleaux-Mulot, 2004).

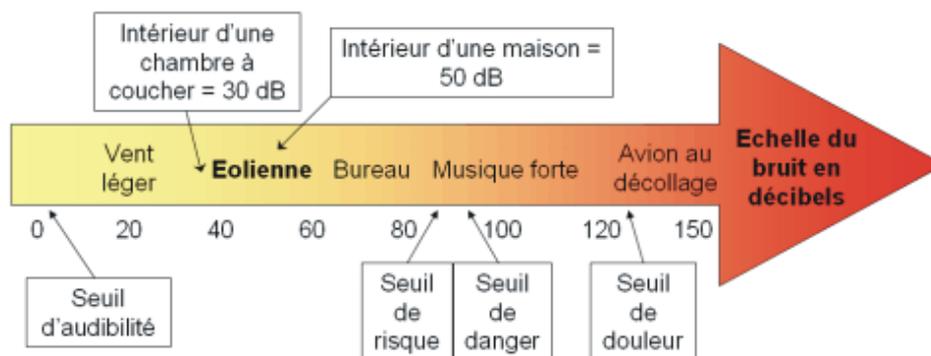


Fig. 5 – Situation de l'éolienne sur l'échelle du bruit (Fleaux-Mulot, 2004).

Grâce à une technologie améliorée le bruit mécanique lié à la transmission et à l'alternateur a été réduit de manière significative par le biais d'une insonorisation améliorée de la nacelle et d'autres mesures comme la modification ou la suppression des engrenages. Sur certains modèles les arbres de transmission sont placés sur des coussinets amortisseurs et sur d'autres modèles des systèmes d'isolation sont présents en haut du mat permettant l'absorption de la propagation des vibrations et des autres bruits mécaniques à la structure.

Mais malgré cet important progrès, la perception du bruit est différente d'un individu à l'autre, et la sensation de gêne est un phénomène très subjectif. Par contre, les petites éoliennes sont généralement très silencieuses car c'est souvent le réducteur de vitesse des grosses machines qui génère du bruit par gros vent. À noter que la loi sur le bruit (Code de la santé publique en France) indique que l'émergence sonore ne doit pas dépasser 5 dBA le jour et 3 dBA la nuit. Dans ce but les éoliennes industrielles doivent préserver un éloignement de 300 m par rapport aux habitations.

3. Éolienne à axe vertical

Silencieuses, les éoliennes à axe vertical peuvent être installées sur des supports fixés sur le toit d'une résidence, d'un bâtiment commercial, d'une ferme ou d'une usine. Par conséquent, son installation ne nécessite pas des endroits vastes. En plus, elles captent l'énergie du vent quelque soit sa direction. Il existe trois types d'éoliennes à axe vertical : Savonius, Darrieus et à cône.

3.1. Éolienne de type Savonius

Son rotor est composé par deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe (Fig. 6). Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. Cette éolienne est caractérisée par sa forme esthétique et par sa faible vitesse de démarrage (2 à 3 m/s). Peu bruyante, elle s'intègre parfaitement en ville et son fonctionnement ne dépend pas de la direction du vent. Le coefficient de performance, C_p , peut atteindre la valeur de 0,3. Par contre, son rendement est faible et son poids est élevé.

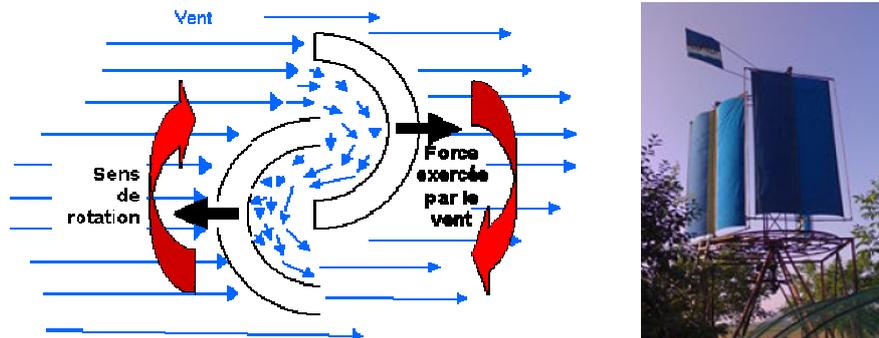


Fig. 6 – Éolienne de type Savonius.

3.2. Éolienne de type Darrieus

Cette éolienne peut fournir une puissance plus élevée que celle du type Savonius. Par contre, elle ne peut pas démarrer toute seule. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensités variables, la résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (Fig. 7). Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation d'une génératrice en moteur). Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépassent

que très rarement 500 kW en raison de leur grande sensibilité. Leur rendement est plus important que celui d'une éolienne de type Savonius.



Fig. 7 – Éolienne de type Darrieus.

3.3. Éolienne à cône

L'éolienne à cône se compose de plusieurs couches minces de puces aérodynamiques (ailerons) connectés *via* des sous-fils à un point de distribution central où l'énergie du vent est exploitée par un dynamo et convertie en énergie électrique. Le centre du cône se compose d'une tige de distribution (en graphite) de poids léger. Les cônes ont une extrémité secondaire flexible qui permet aux cônes à poursuivre le chemin de vent et ainsi de recueillir un maximum d'énergie (Fig. 8). Les éoliennes à cônes sont légères, elles peuvent être auto-

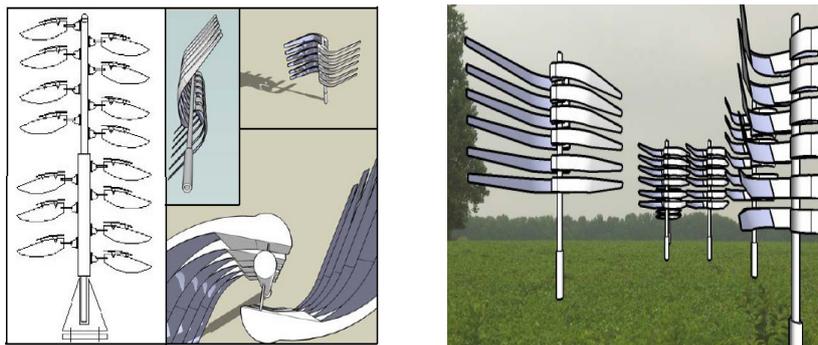


Fig. 8 – Éoliennes à cône (Solh, 2009).

détenues et assemblées pour l'usage individuel et sont facilement adoptées dans les milieux urbains. Les cônes résidentiels sont flexibles en taille. Leur

puissance varie de 100 W à 2000 W. Vingt différents prototypes sont complètes. Le lancement des prototypes physiques est en cours (Solh, 2009).

4. Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical

Considérons deux éoliennes de même puissance nominale (1 kW) et fabriquées par la même compagnie chinoise – “Quingdao Hongkun Wind Power Equipment, Ctd”. Une des éoliennes est à axe horizontal, l’autre est à axe vertical (Fig. 9). Les caractéristiques de ces deux éoliennes sont données dans le Tableau 2. Les courbes de puissance en fonction de la vitesse de vent de ces éoliennes sont illustrées par la Fig. 10.



Fig. 9 – Les éoliennes étudiées: *a* – à axe horizontal; *b* – à axe vertical.

Tableau 2
Caractéristiques des éoliennes étudiées

Axe de l'éolienne	Poids kg	Prix USD	Nombre de lames	Hauteur du mat m	Diamètre m	Vitesse du vent m/s	Tension V
Horizontal	320	1200	3	6	3,2	3...25	48
Vertical	395	2000	6	8	1,8	3...30	220

En fait, l'étude menée sur ces deux types d'éoliennes montrent que

a) L'éolienne à axe horizontal démarre à une vitesse du vent supérieure ou égale à 2,5 m/s. Par contre, celle à axe vertical nécessite une vitesse qui avoisine 3,3 m/s.

b) L'augmentation de la puissance de l'éolienne à axe horizontal en fonction de la vitesse du vent est plus rapide que celle à axe vertical. Par

exemple, pour une vitesse du vent de 4 m/s la puissance produite par l'éolienne à axe horizontal est égale à 200 W tandis que celle délivrée par l'éolienne à axe vertical produit 100 W.

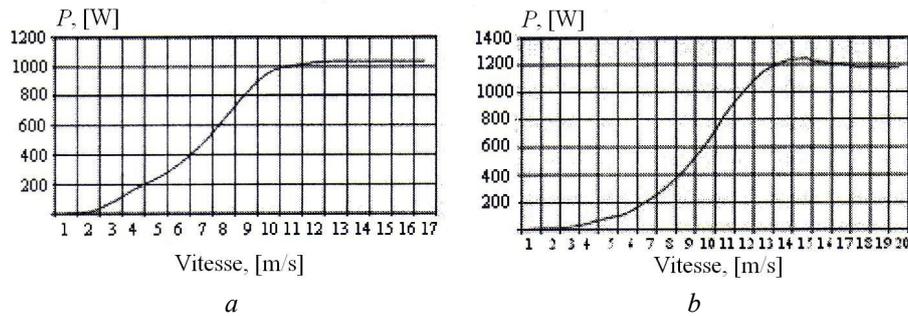


Fig. 10 – Courbes de puissance des éoliennes traitées: *a* – éolienne à axe horizontal; *b* – éolienne à axe vertical.

c) Le coefficient de performance de l'éolienne à axe horizontal est égal à 0,593. Celui de l'éolienne à axe vertical avoisine 0,3.

d) L'éolienne à axe horizontal de diamètre 3 m et de hauteur 6 m occupe plus d'espace que celle à axe vertical, qui est caractérisée par un diamètre de 1,35 m et d'une hauteur de 2,2 m. En général, plus la hauteur de l'éolienne est grande, plus sa production est élevée. Mais cet avantage est limité dans les zones urbaines par des lois à respecter.

e) Le rendement de l'éolienne à axe horizontal est supérieur à celui de l'éolienne à axe vertical,

f) L'éolienne à axe horizontal est plus solide et sa fabrication coûte moins cher que celle à axe vertical.

g) L'éolienne à axe vertical possède l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

À noter que les éoliennes à axe vertical sont de conception plus complexe que les éoliennes à axe horizontal mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier alors que les éoliennes à axe horizontal doivent être équipées d'un système d'orientation par gouverne qui assure une orientation face au vent. En plus, les éoliennes à axe vertical ne connaissent pas les limites dues à la taille des pales et à la vitesse des vents, elles peuvent donc être beaucoup plus adaptées et performantes dans les zones de vents extrêmes.

5. Conclusions

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis, éventuellement, en énergie électrique. Il existe deux types d'éoliennes : les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical.

Dans cet article, une représentation détaillée de chaque type d'éolienne a été effectuée. Cette représentation est suivie par une étude comparative entre deux éoliennes de même puissance, l'une à axe horizontal et l'autre à axe vertical. Cette étude montre que du point de vue efficacité, l'éolienne à axe horizontal est plus efficace que l'éolienne à axe vertical. Elle peut être utilisée pour la production de l'électricité à grande échelle. Alors que du point de vue esthétique, espace et maintenance, l'éolienne à axe vertical est plus favorable, mais reste limitée pour l'usage domestique.

BIBLIOGRAPHIE

- Chowdhury B. H., Chellapilla S., *Double-Fed Induction Generator Control for Variable Speed Wind Power Generation*. Electric Power Syst. Res., Elsevier, 2005, 1-15.
- El-Aimani S., *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2002.
- El-Ali A., *Hybridation des sources d'énergie pour l'habitat: analyse d'une configuration et étude de cas*. Thèse de doctorat, Univ. d'Aix Marseille, France, 2010.
- Fleaux-Mulot R., *Coup de vent sur les éoliennes*. Sci. et avenir, 689, 58-63 (2004).
- Fyrippis I., Axaopoulos P.J., Panayiotou G., *Analysis of Wind Potential and Energy Production in Naxos Island, Greece*. WSEAS Trans. on Power Syst., 3, 8, 567-576 (2008).
- Laverdure N., Roye D., Bacha S., Belhomme R., *Technologie des systèmes éoliens Intégration dans les réseaux électriques*. La revue 3EI, 39 (2004).
- Macaron C., Sassounian A., Bou Abssi T., *Wind Energy in Lebanon, a Personal Experience*. Arab Water World (AWW) J., 33, 1, 18-19 (2009).
- Mirecki A., *Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*. Thèse de doctorat de l'INPT, 2005.
- Mitchell K., Nagrial M., Rizk J., *Simulation and Optimisation of Renewable Energy Systems*. Electr. Power a. Energy Syst., 27, Elsevier, 177-188 (2005).
- Multon B., *L'énergie électrique: analyse des ressources et de la production*. Journées électrot. du club EEA, Paris, 28-29 janvier 1999, 1-8.
- Multon B., *Production d'électricité par des sources renouvelables*. Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Électrique, D4005/6, mai 2003.
- Multon B., Robin G., Gergaud O., Ben Ahmed H., *Le génie électrique dans le vent: état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne*. JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- Poitiers F., *Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne: machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau*. Thèse de doctorat, Univ. de Nantes, décembre 2003.
- Solh O., *Wind Cone*. Global Center for Experimental Struct., USA, 2009.
- Wildi T., Sybille G., *Electrotechnique*, 4^{me} éd., De Boeck, 2005.
- * * * Site web : <http://windturbinehk.en.alibaba.com>. Qingdao Hongkun Wind Power Equipment Co., Ltd.

- * * Site web: <http://badkiller.alex.pagesperso-orange.fr>, L'éolienne, fonctionnement et création.
- * * Site web: <http://installationsclassees.ecologie.gouv.fr>, Réglementation bruit - Inspection des installations classées.
- * * Site web: <http://sites-test.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/index.htm>, Energies renouvelables.
- * * Site web: <http://www.aerogenerateur.com/eolien.html>, Énergie éolienne.
- * * Site web: <http://www.info-eolien.com/eoliennes-vertical.html>, Info Éolien: Le guide de l'éolien et du petit éolien.

STUDIUL COMPARATIV AL EOLIENELOR CU AX ORIZONTAL ȘI AL EOLIENELOR CU AX VERTICAL

(Rezumat)

Energia eoliană, considerată ca sursă nepoluantă, reprezintă una dintre opțiunile cele mai durabile printre posibilitățile viitorului. Captatorii eolieni sunt clasati, în raport cu orientarea axelor lor și în raport cu rotația vântului. În acest sens există captatori cu axa orizontală și captatori cu axa verticală. Mai întâi s-a studiat fiecare tip de captator în parte iar apoi s-a efectuat un studiu comparativ al acestor două tipuri.