

## Estimation de la puissance énergétique éolienne à partir de la distribution de Weibull sur la côte béninoise à Cotonou dans le Golfe de Guinée

Mathias Adjimon Houekpoheha <sup>1,2,1</sup>, Basile Bruno Kounouhewa <sup>2,3,2</sup>,  
Bernard Noukpo Tokpohozin <sup>1,2,3</sup> and Cossi Norbert Awanou <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques  
IMSP/UAC 01, B.P. 613, Porto-Novo, Bénin

<sup>2</sup> Centre Béninois de la Recherche Scientifique et Technique  
CBRST 03, B.P. 1665 Cotonou, Bénin

<sup>3</sup> Laboratoire de Physique du Rayonnement  
FAST/UAC 01, B.P. 526, Cotonou, Bénin

(reçu le 18 Juillet 2014 – accepté le 30 Septembre 2014)

**Résumé** - La situation énergétique au Bénin est caractérisée par un faible taux d'accès à l'électricité et une dépendance quasi-totale vis-à-vis de l'extérieur en énergie électrique. Sur la côte béninoise dans le Golfe de Guinée, on observe la propagation d'un vent quasi permanent et régulier. Une solution avantageuse pour le Bénin et la Sous-région est la récupération et la transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique. En utilisant la distribution de Weibull [1] et la distribution logarithmique du vent dans l'atmosphère [2], nous avons défini la densité de distribution du vent sur la côte béninoise à Cotonou et exprimé le potentiel énergétique éolien. A partir de ces expressions et utilisant les mesures faites p le Millénium Challenge Account (MCA-Bénin) en 2011 dans le cadre du projet d'extension du Port Autonome de Cotonou et les données obtenues auprès de l'ASECNA, nous avons fait une estimation du potentiel énergétique éolienne sur la côte du Bénin.

**Abstract** - The energy situation in Benin is characterized by low access to electricity and almost total dependence on outside electrical energy rates. On the coast of Benin in the Gulf of Guinea, the propagation of a quasi-permanent and steady wind is observed. An advantageous solution for Benin and the sub-region is the recovery and conversion of wind energy into electrical energy. Using the Weibull distribution [1] and the logarithmic distribution of wind speed in the atmosphere [2], we defined the distribution density of the wind on the coast of Benin in Cotonou and expressed the wind energy potential. From these expressions and using measurements made by the Millennium Challenge Account (MCA-Benin) in 2011 as part of the expansion project of the Port of Cotonou and the data obtained by ASECNA, we made an assessment of wind energy power on the coast of Benin.

**Keywords:** Wind in Cotonou - Weibull distribution - Wind power - Distribution of the wind - Wind speed - Wind direction.

### 1. INTRODUCTION

La question énergétique est une problématique d'envergure mondiale. Elle prend aujourd'hui une acuité particulière avec la raréfaction des ressources fossiles non renouvelables. Leur inégalité répartition géographique et les tensions qui en résultent sur les prix font de la question énergétique, un enjeu de développement majeur.

---

1 mathias.houekpoheha@imsp-uac.org ; adjimath@gmail.com

2 kbbasile@gmail.com

3 tokpober@gmail.com ; cawanou@gmail.com

Dans le Golfe de Guinée, la réflexion sur la maîtrise des énergies renouvelables est partout présente. Les énergies renouvelables constituent une des clés de la résolution de la crise énergétique dans la sous-région. L'une des préoccupations actuelles du Bénin et même de la sous-région, est l'exploration des sources d'énergies renouvelables afin de procéder à leur valorisation comme approches de solutions à la crise énergétique qui secoue le monde.

Le vent est un phénomène aérodynamique par nature très complexe. Par suite de la variabilité des très nombreux paramètres qui le gouvernent, sa vitesse horizontale instantanée présente un caractère spatio-temporel fluctuant qui justifie des considérations spectrales. Une approche simple, valable pour les zones climatiques intertropicales, considère un processus caractérisé par la distribution de Weibull ou la distribution hybride de Weibull selon la fréquence des valeurs de sa vitesse [1, 3, 4].

L'objectif de ce travail, réalisé à Cotonou dans le golfe de Guinée, est de définir la fonction densité de distribution de vitesse sur le site et d'estimer, à partir des mesures de données météorologiques acquises grâce au Millenium Challenge Account et à l'ASECNA, les puissances éoliennes disponibles et récupérables de façon stable au cours d'une journée d'une part et le long d'une année d'autre part en fonction de l'altitude.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1 Puissance éolienne disponible

La puissance éolienne disponible sur le site, par unité de surface, est donnée par: [1, 3-6]

$$P_d = \frac{1}{2} \times \rho_a \times V_m^3 \quad (1)$$

Pour le modèle de Weibull, la fonction de densité de probabilité de la vitesse du vent est la suivante, [1, 3-8]

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} c = 1.125 V_m / (1 - B) \\ k = 1 + 0.482 (V_m - 2)^{0.51} \\ B = 1 - 0.81 (V_m - 1)^{0.089} \end{cases} \quad (2)$$

La moyenne de la puissance n<sup>ième</sup> de la vitesse est donnée par: [5-6]

$$V_m^n = \int_0^\infty v^n \times f(v) \times dv = c^n \times \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} c = \frac{V_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \\ k^2 = \left( \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right)^{-1.086} \end{cases} \quad (3)$$

La moyenne cubique de la vitesse est donnée par [1, 6]

$$V_m^3 = \int_0^\infty v^3 \times f(v) \times dv = c^3 \times \Gamma(1 + 3n/k) \quad (4)$$

En remplaçant  $c$ ,  $k$  et  $V_m^3$  par leur expression précédente, on obtient:

$$P_d = \frac{1}{2} \times \rho_a \times \left( \frac{1.125 V_m}{0.81 (V_m - 1)^{0.089}} \right)^3 \times \Gamma \left( \frac{4 + 0.483 (V_m - 2)^{0.51}}{1 + 0.483 (V_m - 2)^{0.51}} \right) \quad (5)$$

## 2.2 Puissance éolienne récupérable

L'énergie cinétique disponible est convertie en énergie mécanique en utilisant une roue à aubes (ou pâles) appelée communément éolienne. La vitesse du vent en aval de la roue, n'étant jamais nulle, ceci implique que la puissance éolienne disponible n'est pas entièrement récupérée au niveau de l'hélice. Si  $C_r$  est le coefficient de puissance éolienne récupérable de celle disponible, on a: [8-10]

$$P_r = C_r \times P_d \quad (6)$$

$$\Rightarrow P_r = \frac{1}{2} \times \rho_a \times C_r \times \left( \frac{1.125 V_m}{0.81 (V_m - 1)^{0.089}} \right)^3 \times \Gamma \times \left( \frac{4 + 0.483 (V_m - 2)^{0.51}}{1 + 0.483 (V_m - 2)^{0.51}} \right) \quad (7)$$

Pour la loi de Betz, cette limite est  $C_r=16/27$ , [8, 10]. Dans la pratique,  $0.35 \leq C_r \leq 0.45$ , [10]

## 2.3 Puissance éolienne récupérable à une altitude $z$

Si  $V_m$ , est la vitesse du vent à une altitude  $z$  et  $V_0$ , celle correspondant à une altitude  $h=10m$ , la distribution verticale de la vitesse est: [2, 6, 11]

$$V_m = V_0 \times \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(h/z_0)} \quad \text{avec } z_0=0.0002m \text{ sur la surface de l'eau} \quad (8)$$

$$\Rightarrow V_m = V_0 \times \frac{\ln(2/0.0002)}{\ln(10/0.0002)} \approx V_0 \left( \frac{8.52 + \ln z}{10.5} \right) \quad (9)$$

Ainsi, à une altitude  $z$ , la puissance énergétique éolienne récupérable par unité de surface est:

$$\Rightarrow P_r(z) = \frac{1}{2} \times \rho_a \times C_r \times \left( \frac{1.125 V_0 \times \left( \frac{8.52 + \ln z}{10.52} \right)}{0.81 \left( V_0 \left( \frac{8.52 + \ln z}{10.52} \right) - 1 \right)^{0.89}} \right)^3 \times \Gamma \left( \frac{4 + 0.483 \left( V_0 \left( \frac{8.52 + \ln z}{10.52} \right) - 2 \right)^{0.51}}{1 + 0.483 \left( V_0 \left( \frac{8.52 + \ln z}{10.52} \right) - 2 \right)^{0.51}} \right) \quad (10)$$

## 2.4 Présentation du site d'étude et des données exploitées:

La zone côtière du Bénin comprise entre  $6^{\circ}15'$  et  $7^{\circ}00'$  de latitude Nord, s'inscrit dans le bassin sédimentaire côtier dont les terrains les plus anciens remontent au Crétacé (fin de l'ère secondaire). Le climat est de type subéquatorial avec deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses altérées [12]. Leur répartition au cours de l'année s'explique

par le balancement du front inter tropical composé de la mousson du Sud-Ouest, vent maritime pluvieux, et de l'alizé du Nord-Est, vent continental sec.

Sur la côté béninoise, l'air est humide et sa densité est  $\rho_a = 1.3 \text{ kg/m}^3$

Lors de l'extension du port autonome de Cotonou, le Millenium Challenge Account (MCA Bénin), a procédé en 2011 à une série de mesures. Dans ces mesures, figurent les vitesses et la direction de propagation du vent, relevées à pas de dix minutes et allant du mois de Juin 2011 à Novembre 2011. Ces mesures sont effectuées à pas de 10 min. Il est défini dans la suite une journée types pour chaque mois afin de définir la vitesse moyenne mensuelle stable du vent de Juin 2011 à Août 2011.

A partir des données, tri horaires obtenues de l'ASECNA sur le site, nous avons évalué la vitesse moyenne annuelle stable du vent de 2000 à 2012.

### 3. RESULTATS, ANALYSE ET DISCUSSION

Les courbes, des figures 1 et 2, traduisent respectivement les variations de la direction de propagation et la valeur moyenne stable du vent dans le Golfe de Guinée à Cotonou dans les mois de Juin, Juillet et Août 2011.

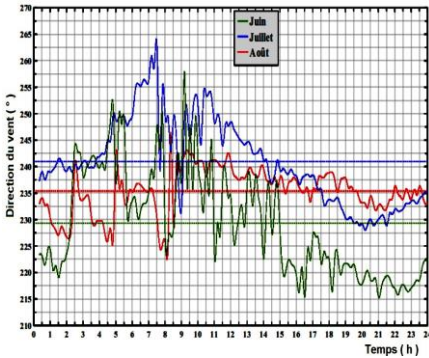


Fig. 1: Direction de propagation du vent au cours de chaque journée-type

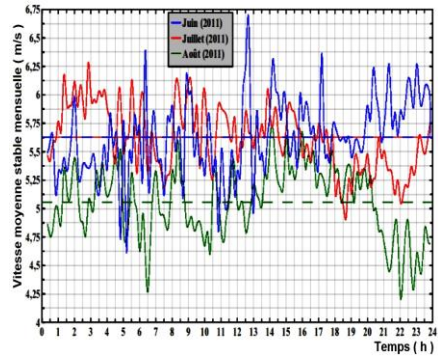


Fig. 2: Valeur moyenne de la vitesse stable du vent au cours de chaque journée-type

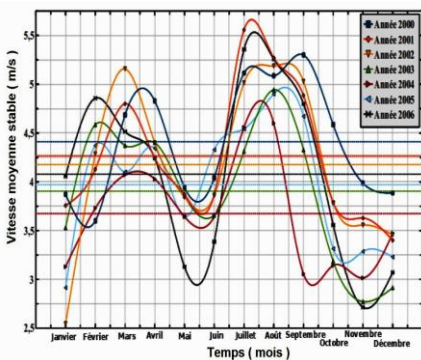


Fig. 3: Valeur moyenne mensuelle de la vitesse stable du vent au cours des années 2000 à 2006

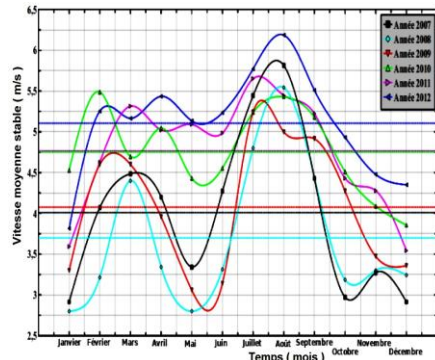


Fig. 4: Valeur moyenne mensuelle de la vitesse stable du vent au cours des années 2007 à 2012

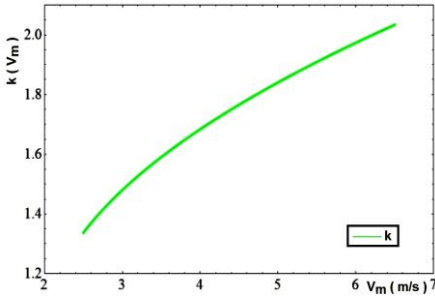


Fig. 5: Variation du facteur de forme en fonction de la vitesse moyenne

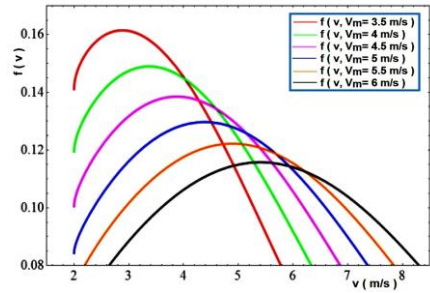


Fig. 6: Evolution de la fonction de densité de la distribution de Weibull en fonction de la vitesse moyenne

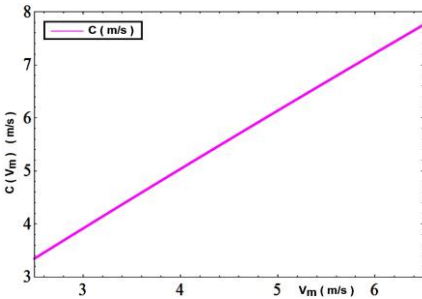


Fig. 7: Variations du facteur d'échelle en fonction de la vitesse moyenne

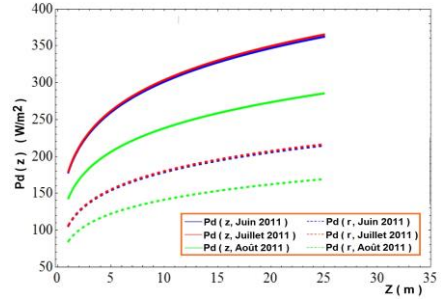


Fig. 8: Variations des puissances éoliennes disponible et récupérable en fonction de l'altitude et de la vitesse moyenne

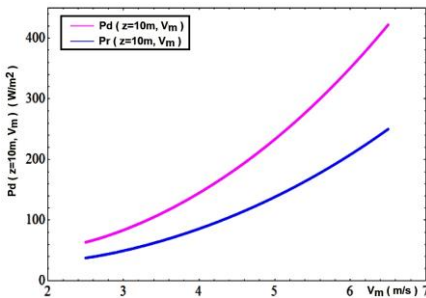


Fig. 9: Variations des puissances éoliennes disponible et récupérable en fonction de la vitesse moyenne à l'altitude  $z = 10$  m

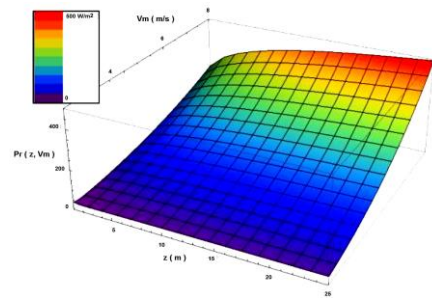


Fig. 10: Variations de la puissance éolienne récupérable en fonction de l'altitude  $z$  et de la vitesse moyenne  $V_m$

Les différentes courbes des figures 1, 2, 3 et 4, qui traduisent les variations de la direction de propagation et la valeur moyenne stable de la vitesse du vent, sont obtenues à partir des mesures de terrain et montrent que:

- La vitesse moyenne stable du vent, au cours d'une journée, varie entre 4.25 m/s et 6.75 m/s.
- Dans le Golfe de Guinée au Bénin, le vent est régulier et sa vitesse moyenne stable à Cotonou, prend sa valeur maximale entre cinq (10h.) et douze (21h. GMT).
- Le vent à Cotonou, dans le Golfe de Guinée, est régulier. Les mois de Février, Mars, Avril, Juillet, Août et Septembre sont les périodes du fort vent. La valeur stable de la

vitesse moyenne du vent, de 2000 à 2012, est d'environ 5 m/s et elle oscille entre 2.5 m/s et 6.5 m/s.

- En prenant le Sud polaire comme l'origine du repère directionnel, la direction de propagation du vent au Bénin dans le Golfe de Guinée varie entre  $215^\circ$  et  $265^\circ$  avec une moyenne de  $240^\circ$  environ.

La courbe de la figure 5, montre que le facteur de forme est une fonction croissante de la vitesse moyenne. Il varie entre 1.3 et 2.1. Quant à la courbe de la figure 6, elle montre que le facteur d'échelle oscille entre 3.5 m/s et 7.5 m/s.

Les courbes de la figure 8, montrent l'évolution des puissances éoliennes disponible et récupérable sur le site étudié, au cours de chaque journée-type des mois de Juin, Juillet et Août 2011, en fonction de l'altitude  $z$  qui varie entre 1 m et 25 m. Elles révèlent que:

- La puissance éolienne disponible varie entre  $175 \text{ W/m}^2$  et  $350 \text{ W/m}^2$  pour les mois de Juillet et d'août, tandis qu'elle varie de  $150 \text{ W/m}^2$  à  $260 \text{ W/m}^2$  dans le mois de Juin.
- La puissance éolienne récupérable oscille entre  $175 \text{ W/m}^2$  et  $350 \text{ W/m}^2$  pour les mois de Juillet et d'août tandis qu'elle varie de  $150 \text{ W/m}^2$  à  $260 \text{ W/m}^2$  pour le mois de Juin.

La figure 9, indique l'évolution de ces puissances énergétiques à l'altitude  $z=10\text{m}$  en fonction de la vitesse moyenne stable du site qui varie entre 2.5 m/s et 6.5 m/s pour les années d'études.

La courbe de la figure 10 représente les variations de la puissance éolienne récupérable sur le site, en fonction de la vitesse moyenne stable et de l'altitude.

#### 4. CONCLUSION

Des analyses précédentes, il ressort que le vent au Bénin dans le Golfe de Guinée est régulier et se propage suivant la direction Sud-Nord-Est ( $240^\circ$ ) environ, avec une vitesse moyenne stable de 5 m/s à l'altitude  $z=10\text{m}$ . A cette altitude, la puissance éolienne récupérable est d'environ 160 Watts par unité de surface. Les périodes du vent fort sont Février, Mars et Avril d'une part et Juillet, Août et Septembre au cours de chacune des années, avec une forte intensité dans la dernière période.

Au cours de chaque journée, le vent souffle avec une forte intensité entre 10 heures et 21 heures GMT. Les vents dans le golfe de Guinée sont rares fois calmes. Ils constituent de ce fait, une source inépuisable d'énergies renouvelables dont l'exploitation contribuerait fortement à palier au problème de la crise énergétique que vit la sous-région.

#### NOMENCLATURE

$\rho_a$ , Densité de l'air, $\text{kg/m}^3$	$v$ , Vitesse du vent, m/s
$f(v)$ , Fonction de distribution de vitesses de Weibull	$C_r$ , Coefficient de puissance éolienne récupérable
$z_0$ , Longueur de rugosité, m	$V_m$ , Vitesse moyenne stable du vent, m/s
$k$ , Facteur de forme	$c$ , Facteur d'échelle, m/s
$P_d$ , Puissance éolienne disponible par unité de surface, $\text{W/m}^2$	$P_r$ , Puissance éolienne récupérable par unité de surface, $\text{W/m}^2$
$z$ , Altitude, m	

## REFERENCES

- [1] N.K. Merzouk et M. Merzouk, 'Estimation du Potentiel Energétique Eolien Utilisable- Application au Pompage dans les Hauts Plateaux', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp. 155 – 163, 2006.
- [2] M.C. Rouault, E. Delaunay, J.P. Aulanier et R. Nerzic, 'Modélisation du Vent en Bassin et dans les Modèles Numériques', 10<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydrodynamique, Nantes, 7-9 Mars 2005.
- [3] N. Fichaux, 'Evaluation du Potentiel Eolien Offshore et Imagerie Satellitaire', Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, Spécialité 'Energétique', 2003.
- [4] O. Badran and E. Abdulhadi, 'Evaluation of Factors Affecting Wind Power Generation in Jordan', The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, Taiwan, November 8-12, 2009.
- [5] M. Kazet, R. Mouangue, A. Kuitche, J.M. Ndjaka et S. Takam, 'Modélisation et Simulation Numérique des Données du Vent en Vue d'une Prédiction de l'Energie Electrique d'origine Eolienne: Cas d'un Site de la Ville de Ngaoundéré au Cameroun', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 16, N°3, pp. 527 – 538, 2013.
- [6] Z. Sen, A. Altunkaynak, and T. Erdik, 'Wind Velocity Vertical Extrapolation by Extended Power Law', Hindawi Publishing Corporation, Advances in Meteorology, Volume 2012, Article ID 178623, 6 pages, doi:10.1155/2012/178623
- [7] RETScreen International, 'Analyse de Projets de Centrale Éolienne', ISBN : 0-662-75475-1, N° de catalogue : M39-97/2003F-PDF, © Ministre de Ressources naturelles Canada 2001 - 2004.
- [8] H. Faïda, J. Saadi, M. Khaider, S. El Alami et M. Monkade, 'Etude et Analyse des Données du Vent en Vue de Dimensionner un Système de Production d'Energie Eolienne: Cas d'un Site au Nord du Maroc', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13, N°3, pp. 477 – 483, 2010.
- [9] S.M. Bolik, 'Modelling and Analysis of Variable Speed Wind Turbines with Induction Generator during Grid Fault', Aalborg University Institute of Energy Technology, DK – 9220 Aalborg East, 2004.
- [10] A.W. Manyonge, R.M. Ochieng, F.N. Onyango and J.M. Shichikha, 'Mathematical Modeling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis', Applied Mathematical Sciences, Vol. 6, N°91, pp. 4527 – 4536, 2012,
- [11] [http://wind-data.ch/tools/pro\\_le.php](http://wind-data.ch/tools/pro_le.php)
- [12] E.G.C. Degbe, M.L. Oyede et A.R. Laïbi, 'Risques Environnementaux sur le Littoral Béninois: Erosion Côtière et Stratégies de Lutte', Journées Internationales du Dragage, Gabon (Libreville), 2010.