

Influence de la température, de la pression et de l'humidité relative de l'air sur le potentiel éolien dans la zone côtière du Bénin dans le Golfe de Guinée

Aimé Audran Koukpedemji ^{1*}, Basile Bruno Kounouhewa ^{1,2}, Eusèbe Agoua ^{3†}
Mathias Adjimon Houekpoheha ^{1,2} et Jean Bio Chabi Orou ^{1‡}

¹ Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques
IMSP / Université d'Abomey Calavi, 01 B.P. 613, Porto-Novo, République du Bénin

² Centre Béninois de la Recherche Scientifique et Technique
CBRST, 03 B.P. 1665, Cotonou, République du Bénin

³ École Polytechnique, Université d'Abomey Calavi
EPAC /UAC, 01 B.P. 526 Cotonou, République du Bénin

(reçu le 27 Octobre 2014 – accepté le 21 Juin 2015)

Résumé - *Le Bénin ne possède pas des sources de production d'énergie électrique propre à lui-même. Ceci explique sa dépendance énergétique des pays voisins. Pourtant il possède sur sa côte, dans le Golfe de Guinée, une propagation d'un vent quasi permanent et régulier. Une solution avantageuse pour ce pays et la sous-région est la récupération et la transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique. Connaissant l'expression de la puissance éolienne [3], celles de la masse volumique de l'air sec [4, 13] et de l'air humide [13], ainsi que celle de l'humidité relative [4, 13], nous avons établi l'expression du coefficient qui montre l'impact de la température, de la pression et de l'humidité relative sur la puissance éolienne. Avec les mesures faites par le projet 'Millénium Challenge Account (MCA-Bénin)' en 2011 dans le cadre de l'extension du Port Autonome de Cotonou, nous avons montré l'action des trois paramètres ci-dessus cités sur la puissance éolienne à Cotonou au Bénin.*

Abstract - *Benin does not have sources of supply of clean electricity itself. This explains the energy dependence of the neighboring countries. Yet it has on its coast in the Gulf of Guinea, as pre ad of almost constant and steady wind. An advantageous solution for this country and the sub-region is the recovery and conversion of wind energy into electrical energy. Knowing the expression of wind power [3], those of the density of dry air [4, 13] and moist air [13] as well as the relative humidity [4, 13] we determined the expression of the coefficient to show the impact of temperature, pressure and relative humidity on the wind power. With measurements made by the 'Millennium Challenge Account (MCA-Benin)' in 2011 as part of the extension of the Port of Cotonou, we showed the action of the three parameters mentioned above on wind power in Cotonou, Benin.*

Keywords: Wind Energy - Meteorological factors - Wet wind - Gulf of Guinea - Coastal area of Benin.

1. INTRODUCTION

La consommation énergétique mondiale évolue rapidement dans toutes les régions du monde. Cette évolution va continuer à cause de l'augmentation de la population mondiale. Les sources d'énergies existantes n'arrivent plus à satisfaire la demande et de plus elles diminuent de jour en jour. Ainsi, les énergies renouvelables sont celles qui vont s'imposer bientôt à cause de la facilité de leurs exploitations.

* kaudranus2000@gmail.com ; kbbasile@gmail.com

† eagoua@gmail.com ; adjimath@gmail.com

‡ jchabi@yahoo.fr

Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle.

Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont influencés par plusieurs paramètres tels que: la pression atmosphérique, l'humidité relative, la température, ... [4, 8, 13].

Au Bénin dans le Golfe de Guinée, la maîtrise de ces énergies devient une nécessité. Ceci amène beaucoup de chercheurs à réfléchir sur l'amélioration de ces énergies renouvelables.

L'une d'elles est l'énergie éolienne qui utilise la force du vent. 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 qui est valable pour les zones climatiques intertropicales.

L'objectif de ce travail, réalisé à Cotonou (République du Bénin) dans le golfe de Guinée, est de voir l'impact des paramètres que sont: la pression atmosphérique, l'humidité relative de l'air et la température sur le potentiel énergétique éolien disponible sur le site, [2, 4].

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Présentation du site d'étude et des données exploitées

Le Bénin possède une zone côtière comprise entre 6°15 et 7°00 de latitude Nord. Son climat est de type subéquatorial ayant deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses alternées, [24]. 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 côte béninoise, l'air est humide.

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, la température, la pression et l'humidité relative relevées à pas de dix minutes et allant du mois de Juin 2011 à Décembre 2011. Ces mesures sont effectuées à pas de 10 min.

2.2 Puissance éolienne du vent pour une densité constante

La puissance éolienne de l'air sec disponible sur un site, dans les conditions normales de pression et de température, par unité de surface, est donnée par [13],

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho_0 v^3 \quad (1)$$

Avec v^3 , la vitesse moyenne cubique du vent, ρ_0 est la masse volumique constante de l'air sec.

2.3 Influence de la pression et de la température sur la puissance éolienne.

La densité du vent sec en fonction de la pression et de la température est donnée par [8, 13, 14],

$$\rho(P, T) = \frac{P}{287.06T} \quad \text{avec} \quad T = 273.15 + \theta \quad (2)$$

P , représente la pression atmosphérique en (Pa) et θ , la température en ($^{\circ}\text{C}$) ou T , en (K).

La puissance éolienne dans les conditions de l'air sec par unité de surface est donnée par,

$$P_s(P, T) = \frac{1}{2} \frac{P}{287.06} v^3 \quad (3)$$

Soit $\alpha_1(P, T)$, le coefficient qui traduit l'influence de la pression et de la température sur la puissance éolienne, il est donné par,

$$\alpha_1(P, T) = P_s(P, T) / P_0 \quad (4)$$

En remplaçant P_s et P_0 , par leurs expressions respectives, on retrouve,

$$\alpha_1(P, T) = \frac{\frac{1}{2} \frac{P}{287.06 T} v^3}{\frac{1}{2} \rho_0 v^3}, \text{ et après simplifications, on obtient,}$$

$$\alpha_1(P, T) = P / 287.06 \rho_0 T \quad (5)$$

2.4 Influence de la pression, de la température et de l'humidité sur la puissance éolienne

La densité du vent humide est donnée par [8],

$$\rho(P, T, H_r) = \frac{P}{R_h T} \quad \text{avec} \quad R_h = \frac{R_s}{1 - \left(H \frac{P_{\text{sat}}}{P} \right) \left(1 - \frac{R_s}{R_v} \right)} \quad (6)$$

Où $R_s = 287.06 \text{ J/kg.K}$ est la constante spécifique de l'air sec, $R_v = 461 \text{ J/kg.K}$,

$$H_r = \frac{P}{P_{\text{sat}}} \times 100 \quad (7)$$

avec l'humidité relative en (%) et P la pression. P_{sat} est la pression de saturation donnée par [8, 12],

$$P_{\text{sat}} = 6110.213 \exp \left(\frac{17.5043 \theta}{\theta + 241.2} \right) \quad \text{avec} \quad -30 < \theta < 70^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

La masse volumique donne finalement,

$$\rho(P, T, H_r) = \frac{1}{287.06 T} \times \left(P - 230.617 H_r \times \exp \left(\frac{17.5043 \theta}{\theta + 241.2} \right) \right) \quad (9)$$

La puissance du vent humide est donnée par,

$$P_h(P, T, H_r) = \frac{1}{2} \frac{1}{287.06 T} \times \left(P - 230.617 H_r \times \exp \left(\frac{17.5043 \theta}{\theta + 241.2} \right) \right) v^3 \quad (10)$$

Soit $\alpha_2(P, T, H_r)$, le coefficient qui traduit l'influence de la pression, la température et de l'humidité sur la puissance éolienne, il est donné par,

$$\alpha_2(P, T, H_r) = \frac{P_h(P, T, H_r)}{P_0}$$

En remplaçant $P_h(P, T, H_r)$ et P_0 par leurs expressions, on a,

$$\alpha_2(P, T, H_r) = \frac{\frac{1}{2} \frac{1}{287.06 T} \times \left(P - 230.617 H_r \times \exp\left(\frac{17.5043 \theta}{\theta + 241.2}\right) \right) v^3}{\frac{1}{2} \rho_0 v^3},$$

après simplification, on retrouve,

$$\alpha_2(P, T, H_r) = \frac{1}{351.6485 T} \left(P - 230.617 H_r \times \exp\left(\frac{17.5043 \theta}{\theta + 241.2}\right) \right) \tag{11}$$

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Résultats

Les courbes des figures 1, 2 et 3 ci-dessous traduisent respectivement les variations de l'humidité relative, de la pression et de la température au cours de chaque journée-type définie pour les mois de Juin à Décembre 2011.

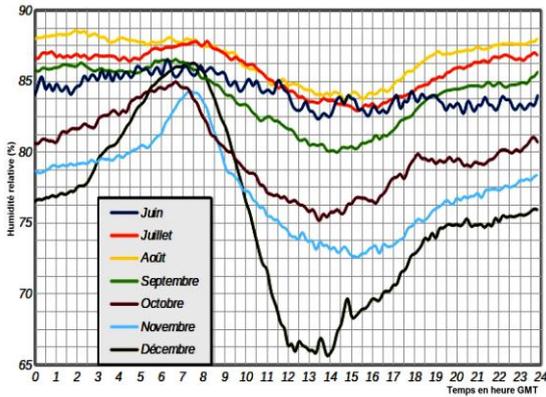


Fig. 1: Evolution de l'humidité relative des sept derniers mois de 2011

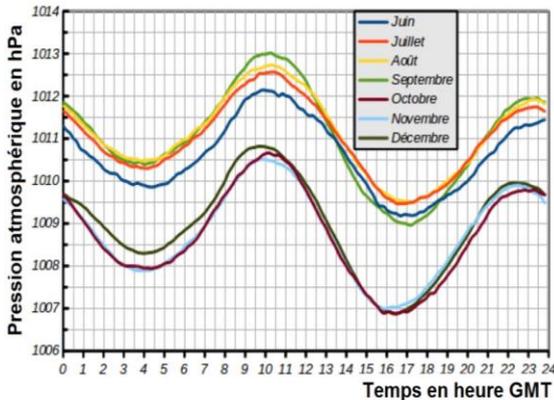


Fig. 2: Evolution de la pression atmosphérique des sept derniers mois de 2011

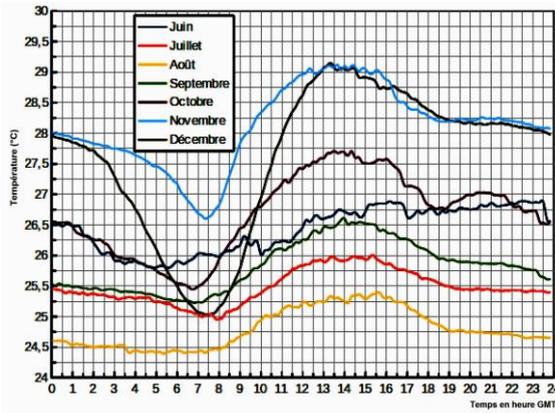


Fig. 3: Evolution de la température des sept derniers mois de 2011

La figure 4 représente l'évolution du coefficient qui traduit les variations de la puissance éolienne en fonction de la température à pression atmosphérique constante.

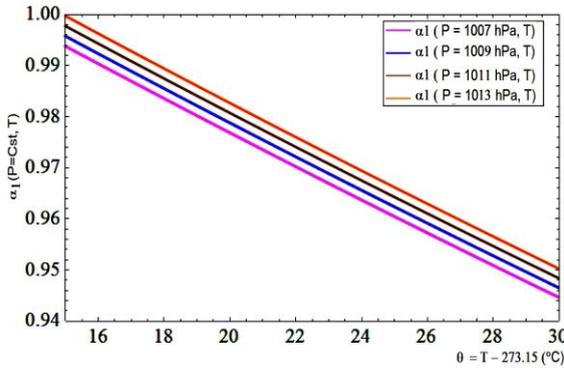


Fig. 4: Evolution de α_1 en fonction de T à P constante

La figure 5 montre l'évolution du coefficient qui traduit les variations de la puissance éolienne en fonction de la pression atmosphérique à température constante

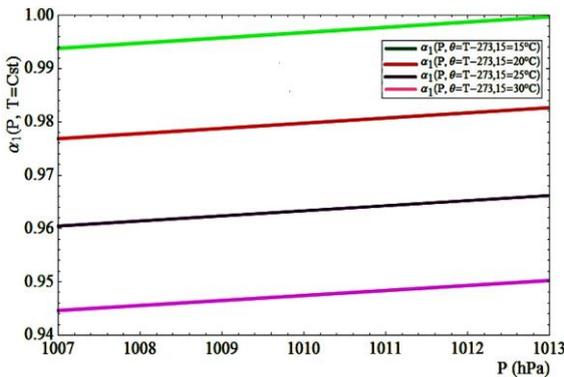


Fig. 5: Evolution de α_1 en fonction de P à T constante

Les courbes des figures 6 et 7 révèlent l'évolution du coefficient qui traduit les variations de la puissance éolienne en fonction de l'humidité relative à pression atmosphérique et à température constante dans la zone côtière du Golfe de Guinée.

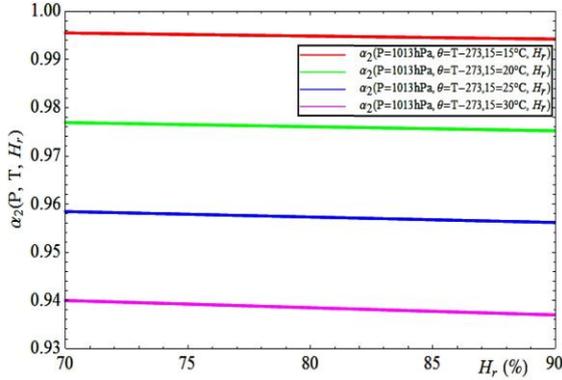


Fig. 6: Evolution de α_2 en fonction de H à P et T constante

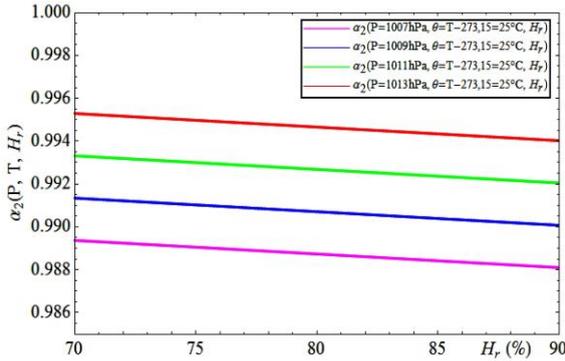


Fig. 6: Evolution de α_2 en fonction de H à P et T constante

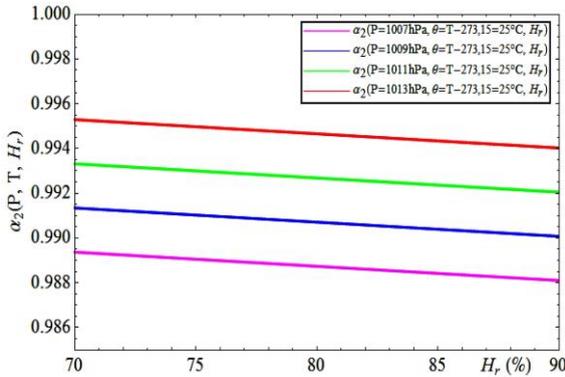


Fig. 7: Evolution de α_2 en fonction de H à P et T constante

3.2 Analyse et discussion des résultats

Les courbes de la figure 1 qui traduisent l'évolution de l'humidité relative des sept derniers mois de l'année 2011, révèlent que,

- L'humidité relative, au cours de la période de mesures dans le Golfe de Guinée, varie de façon presque sinusoïdale au cours de chaque journée-type.
- Elle retrouve ses valeurs maximales aux environs de 8h et de 23h GMT et ses valeurs minimales entre 11h et 15h GMT.
- Elle oscille entre 80 et 90 % dans les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre.

- Dans les mois d'Octobre et de Novembre 2011, elle varie entre 72 et 85 %.
- Elle est très instable dans le mois de Décembre et plus forte dans les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre.

Ces résultats montrent que l'humidité relative varie en générale entre 70 et 90 % au cours de cette campagne de mesure dans la zone côtière du Golfe de Guinée.

Les variations des courbes de la figure 2 révèlent que la pression atmosphérique dans la zone côtière du Bénin,

- Varie de façon sinusoïdale au cours des journées-type de chaque mois.
- Retrouve ses valeurs minimales aux voisinages de 4h et de 17h GMT, tandis que ses valeurs maximales apparaissent aux environs de 10h et de 23h GMT.
- Oscille entre 1009 et 1013 hPa au cours des mois de Juin, Juillet, Août et Septembre 2011, tandis qu'elle ne varie qu'entre 1007 et 1011 hPa au cours des mois d'Octobre, Novembre et Décembre.

Ces résultats montrent qu'au cours de chaque journée-type, la pression atmosphérique dans le Golfe de Guinée à Cotonou varie de façon régulière au cours de chaque journée entre 1007 et 1013 hPa. Elle est forte dans le troisième trimestre de l'année d'étude et faible dans le dernier.

Les courbes de la figure 3 qui traduisent l'évolution de la température dans la zone côtière du Bénin, montrent que la température,

- au cours de la période de mesures dans le Golfe de Guinée, varie de façon quasi sinusoïdale au cours de chaque journée-type.
- Elle retrouve ses valeurs maximales entre 11h et 15h GMT, tandis que ses valeurs minimales sont observées aux environs de 8h et de 23h GMT.
- Elle oscille entre 24 et 26.5°C dans les mois de Juillet, Août et septembre tandis que dans les mois de Juin, Octobre Novembre et Décembre, elle varie entre 25 et 29.5°C.

Ces résultats montrent que la température varie en général entre 24 et 30 °C environ au cours de cette campagne de mesures dans la zone côtière du Golfe de Guinée. La température et l'humidité relative sont deux grandeurs qui varient en sens inverse: lorsque la température augmente l'humidité relative augmente et vis versa.

L'allure des courbes de la figure 4 montre que la puissance éolienne est une fonction décroissante de la température. Sur le site d'étude, lorsque la température varie entre 24 et 30°C, la puissance éolienne diminue de 0 à 5% environ.

Quant à l'évolution des courbes de la figure 5, elle révèle que la puissance éolienne est une fonction croissante de la pression atmosphérique sur le site. Lorsque la pression atmosphérique varie de 1007 à 1013 hPa, le coefficient qui traduit la variation de la puissance éolienne croît de 94 à 97%

Les variations des courbes de figures 6 et 7 stipulent que la puissance éolienne est une fonction décroissante de l'humidité relative. Elle diminue d'environ 15 % sur le site de mesure.

Somme toute, les figures 4-7 montrent que la puissance éolienne dans la zone côtière du Golfe de Guinée est une fonction décroissante de la température et de l'humidité relative mais elle est une fonction croissante de la pression atmosphérique.

4. CONCLUSION

De ce travail, il ressort que dans le Golfe de Guinée, l'humidité relative varie en général entre 70 et 90 % au cours de cette campagne de mesure dans la zone côtière du Golfe de Guinée.

Au cours de chaque journée-type, la pression atmosphérique dans la zone côtière de Cotonou varie de façon régulière au cours de chaque journée entre 1007 et 1013 hPa. Elle est forte dans le troisième trimestre de l'année d'étude et faible dans le dernier. La température varie en générale entre 24 et 30°C environ au cours de chaque journée. La température et l'humidité relative sont deux grandeurs qui varient en sens inverse.

Quant à la puissance éolienne dans la zone côtière du Golfe de Guinée, c'est une fonction décroissante de la température et de l'humidité relative, mais une fonction croissante de la pression atmosphérique.

NOMENCLATURE

θ , Température, (°C)	T , Température, (K)
P_s , Puissance éolienne de l'air sec	ρ_0 , Masse volumique de l'air sec
R_s , Constante spécifique de l'air sec	H_r , Humidité relative
$\rho(P, T)$, Densité, air sec, fonction de la pression et de la température	
$P_s(P, T)$, Puissance éolienne, air sec, fonction de la pression et de la température	
$\alpha_1(P, T)$, Coefficient traduisant l'influence de la pression et de la température sur la pression éolienne	
$\rho(P, T, H_r)$, Densité de l'air humide, fonction de l'humidité relative, de la pression et de la température	
$P_h(P, T, H_r)$, Puissance éolienne de vent humide	
$\alpha_2(P, T, H_r)$, Coefficient traduisant l'influence de l'humidité, de la pression et de la température sur la pression éolienne	

REFERENCES

- [1] A. Adjiri, H. Daaou Nedjari et S. Haddouche, 'Estimation du Potentiel Eolien pour la Région d'In Salah', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 16, N°4, pp. 657 – 666, 2013.
- [2] P. Ailliot et M. Prevosto, 'Modélisation de l'évolution Spatio-Temporelle Des Champs de Vent', Journées de Statistique, Ifremer, Plouzané, France, 2003.
- [3] G. Al Zohbi, P. Hendrick et P. Bouillard, 'Evaluation du Potentiel d'Energie Eolienne au Liban', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 17, N°1, pp. 83 – 96, 2014.
- [4] M.M. Ayiagnigni Gbambié, 'Analyse Statistique de Données de Vent Côtier au Nord du Golfe de Guinée', Rapport de Master, CIPMA/FAST/UAC/2012, pp 1-43.
- [5] O. Badran and E. Abdulhadi, 'Evaluation of Factors Affecting Wind Power Generation in Jordan', The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12, Taipei, Taiwan, 2009.
- [6] P. Carrega, 'Le Vent: Importance, Mesures, Modélisation et Tribulations', Bulletin de la Société Géographique de Liège, Vol 51, pp. 17 - 29, 2008. Downloadé from www.bsglg.be

- [7] L. Pierrat et E. Idée, '*Considérations Statistiques Relatives à la Distribution de la Vitesse du Vent*', Inria, 42^{èmes} Journées de Statistiques, Mai 2010, Marseille, France. 2010
- [8] S.M. El Moustapha, M.L. Ndiaye, P.A. Ndiaye, A.K.O. Mahmoud et I. Youm, '*Influence des Paramètres Météorologiques sur la Production d'un Aérogénérateur: Application sur le Littoral Sahélien*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 17, N°1, pp. 43 – 54, 2014.
- [9] H. Faidal, 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, pp. 477 – 483, 2010.
- [10] N. Fichaux, '*Evaluation du Potentiel Eolien Offshore et Imagerie Satellitale*', Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [11] E. Gil, '*Evaluating the Impact of Wind Power Uncertainty on Power System Adequacy*', Proceedings of PMAPS 2012, Istanbul, Turkey, June 10-14, 2012.
- [12] E. Guerber, G. Le Cozannet et R. Pedreros, '*Modélisation Statistique du Vent: Influence du Changement Climatique sur le Transport Eolien*, X^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14-16 Octobre, Sophia Antipolis, 2008.
- [13] A.M. Houekpohéha, B. Kounouhéwa, B.N. Tokpohozin et N. Awanou, '*Estimation de la Puissance Energétique Eolienne à Partir de la Distribution de Weibull sur la Côte Béninoise à Cotonou dans le Golfe de Guinée*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 17, N°3, pp. 489 – 495, 2014.
- [14] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Masse volumique de l'air](http://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique_de_l'air).
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] A.K Merzouk, M. Merzouk et B. Benyoucef, '*Profil Vertical de la Vitesse du Vent dans la Basse Couche Limite Atmosphérique*', 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique, Albi, France, 28 - 30 Août, pp 1-5., 2007.
- [18] A.K. Merzouk et M. Merzouk, '*Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable: Application au pompage dans les Hauts Plateaux*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp. 155 – 163; 2006.
- [19] M.C. Rouault, E. Delaunay, J.P. Aulanier et R. Nerzic, '*Modélisation du Vent en Bassin et dans les Modèles Numériques*', 10^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique, Nantes, 7-9 Mars, pp. 1 - 14, 2005.
- [20] M. Saïdou, '*Etude du Potentiel Eolien du Jet Nocturne dans la Zone Sahélienne à Partir des Observations de Radars Profileurs de Vent*', Thèse de Doctorat, Université Toulouse 3, 2010.
- [21] 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 p., doi: 10.1155/2012/178623.

- [22] I. Youm, J. Sarr, M. Sall, A. Ndiaye and M.M. Kane, '*Analysis of Wind Data and Wind Energy Potential Along the Northern Coast of Senegal*', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 8, pp. 95 – 108, 2005.
- [23] D.L. Zhao and Y. Toba, '*A Spectral Approach for Determining Altimeter Wind Speed Model Functions*', *Journal of Oceanography*, Vol. 59, N°2, pp. 235 - 244, 2003.
- [24] 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.