

ETUDE DU POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN OFFSHORE DU BENIN

Maurel AZA-GNANDJI ^{a,*}, François-Xavier FIFATIN ^a, Frédéric DUBAS ^b, Christophe ESPANET ^c, Antoine VIANOU ^a

^a Département de Génie Electrique, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, 01BP2009 COTONOU, République du Bénin

^b Département ENERGIE, FEMTO-ST, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Belfort, France

^c Univ. Bourgogne Franche-Comté, Belfort, France

RÉSUMÉ

Ce travail présente l'étude du potentiel énergétique éolien offshore en République du Bénin. La loi de Weibull est utilisée pour modéliser la distribution spatio-temporelle du vent dans la Zone Economique Exclusive (ZEE) du Bénin. A partir de la distribution spatiale de la vitesse du vent à 10 m, les paramètres de Weibull sont calculés dans la ZEE du Bénin. Ces paramètres sont ensuite extrapolés à 80 m, 100 m et 120 m pour déterminer la densité de puissance disponible à ces différentes hauteurs. Les résultats de cette étude montrent que les zones d'intérêt pour la production d'énergie éolienne offshore sont en bordure de la cote et en haute mer dans la ZEE du Bénin. En se référant au standard du National Renewable Energy Laboratory (NREL), l'étude révèle également que le potentiel énergétique éolien offshore du Bénin atteint la classe 7 à une hauteur de 120 m et une classe 6 pour les hauteurs de 100 m et 80 m.

Mots Clés : potentiel énergétique éolien offshore, Zone Economique Exclusive, loi de Weibull, densité de puissance disponible

NOMENCLATURE

Symboles :

Lettres latines :

k	facteur adimensionnel de forme
c	facteur d'échelle
v_{lat,lon_i}	vitesse du vent à une latitude et une longitude définie au pas de temps i , m/s
$f(v_{lat,lon})$	probabilité d'observation de la vitesse de vent $v_{lat,lon}$.
$c_{lat,lon}(h)$	facteur de forme à hauteur h
$k_{lat,lon}(h)$	facteur d'échelle à hauteur h , m/s
N	nombre de données
h_0	hauteur de référence, m
c_0	facteur d'échelle à h_0 , m/s
k_0	facteur de forme à h_0
$P(v_{lat,lon}(h))$	densité de puissance disponible du vent à hauteur h , W/m ²

Lettres grecques :

Γ	fonction gamma
ρ	densité de masse volumique de l'air kg/m ³
Indices / Exposants :	
i	pas de temps
n	coefficient d'extrapolation

1. INTRODUCTION

L'énergie éolienne possède deux applications possibles : celle en mer nommée offshore et celle sur terre ferme nommée onshore. Les fermes éoliennes offshore sont plus intéressantes que leurs homologues onshore à cause de l'impact environnemental réduit et des régimes

de vent en mer plus stables et forts [1]–[3]. De plus, les aérogénérateurs pour application offshore sont plus géants et permettent d'installer des fermes de grande puissance [1]–[3]. Bien qu'intéressantes, les applications offshore requièrent un investissement substantiel et leur maintenance est plus coûteuse que les applications onshore [2], [4]. Cela justifie l'intérêt d'études préalables sur la viabilité du potentiel énergétique éolien offshore avant l'implantation de fermes éoliennes.

* auteur correspondant

Adresse électronique : maurel.aza@gmail.com

La littérature indique plusieurs travaux effectués sur le potentiel énergétique éolien offshore suivant différentes approches. En effet une étude technico-économique du potentiel énergétique éolien a été effectuée dans [5]. Le facteur de capacité et la rentabilité économique d'une éolienne de 8 MW ont été déterminés. L'étude a permis de dégager les zones favorables à la production éolienne dans le site d'étude. Dans le même contexte, une autre étude a été effectuée sur les côtes indiennes [6]. L'approche utilisée est basée sur les systèmes d'informations géographiques pour caractériser le potentiel énergétique éolien des parties Ouest et Est des côtes indiennes.

Dans ce travail nous proposons une analyse du potentiel énergétique éolien offshore suivant une approche spatiotemporelle en utilisant une loi de probabilité. La zone économique exclusive (ZEE) de la République du Bénin est choisie pour cette étude.

Après cette introduction, la section 2 présente les outils et la méthode d'analyse utilisée. La section 3 de cet article présente les résultats obtenus. Enfin, la section 4 présente les principales conclusions de cette étude.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. PRESENTATION DU LIEU D'ETUDE ET DES DONNEES

Cette section présente la zone économique exclusive de la République du Bénin et les données utilisées pour la modélisation effectuée.

2.1.1. Zone économique exclusive du Bénin

La convention des nations unies sur la loi de la mer de Décembre 1982, donne à chaque état côtier une souveraineté sur un territoire en mer nommé Zone Economique Exclusive [7]. Ainsi, l'exploitation des ressources marine, la valorisation du territoire pour la production d'énergie sont des utilisations possibles de la ZEE. La République du Bénin a ratifié cette convention en octobre 1997 [8].

D'après l'institut marine Flanders, la ZEE du Bénin s'étend sur une surface de 35.528,369 km² [9]. Elle est comprise entre les longitudes 1,63° E et 2,97° E et entre la latitudes 2,98° N et 6,51° N et sa délimitation est présentée à la Fig. 1.

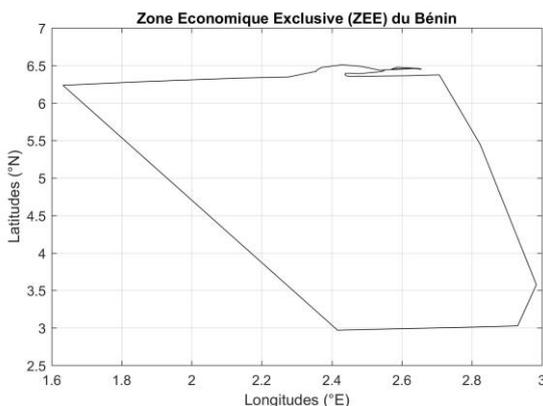


Fig. 1 Délimitation de la ZEE du Bénin

2.1.2. Vitesse du vent

La distribution spatiotemporelle de la vitesse du vent utilisée dans ce travail est obtenue sur le site de l'institution américaine nommée : " National Oceanic and Atmospheric Administration" abrégée NOAA [10]. Ces données sont obtenues à une hauteur de 10 m et couvrent toute la ZEE du Bénin avec une résolution de 0,5° x 0,5° en longitude et en latitude.

La distribution spatiale de la vitesse moyenne annuelle des données journalières du vent en m/s à une hauteur de 10 m dans la ZEE du Bénin est présentée à la Fig. 2. Sur cette figure, on remarque que la vitesse du vent est comprise entre 5 m/s et 6 m/s.

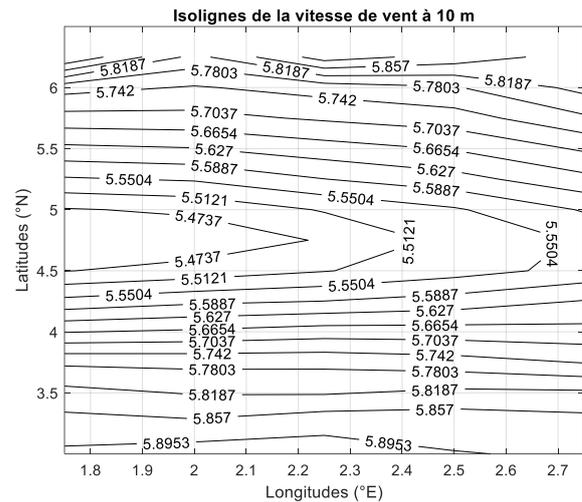


Fig. 2 : distribution spatiale de la vitesse moyenne annuelle du vent en 2013 dans la ZEE du Bénin

2.2. MODELISATION DU POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN

Dans ce travail, la distribution spatiotemporelle de vitesse du vent est modélisée par une loi de probabilité. A partir des paramètres de cette loi, on détermine ensuite la répartition spatiale du potentiel éolien.

2.2.1. Loi de Weibull

Dans le domaine de l'éolien, la loi de Weibull est la plus souvent utilisée pour modéliser la vitesse du vent. Elle est définie par [5], [11]–[20] :

$$f(v_{lat,lon}) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v_{lat,lon}}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v_{lat,lon}}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

Où k représente le facteur adimensionnel de forme, c le facteur d'échelle et $v_{lat,lon}$ représente la vitesse du vent à une latitude et une longitude définie, $f(v_{lat,lon})$ représente la probabilité d'observation de la vitesse de vent $v_{lat,lon}$.

2.2.2. Calcul des paramètres de Weibull

Les méthodes utilisées pour calculer les paramètres de Weibull sont :

- La méthode du tracé de courbe [21] ;
- La méthode des moments [22], [23] ;
- La méthode du maximum de vraisemblance [22], [23];

La méthode recommandée est cependant la méthode du maximum de vraisemblance [22]. Son application consiste à maximiser la fonction de vraisemblance qui conduit à la résolution du système d'équation non linéaire :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{k} + \left[1 - \left(\frac{v_{lat,lon_i}}{c} \right)^k \right] \cdot \ln \left(\frac{v_{lat,lon_i}}{c} \right) \right\} = 0 \\ \sum_{i=1}^N \left(\frac{k}{c} \right) \cdot \left[-1 + \left(\frac{v_{lat,lon_i}}{c} \right)^k \right] = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Où v_{lat,lon_i} représente la vitesse du vent au pas de temps i à longitude et latitude définie et N représente le nombre de données de vitesse de vent disponible. L'équation (2) est résolue dans ce travail en utilisant l'outil Matlab.

2.2.3. Extrapolation des paramètres de Weibull

L'extrapolation des paramètres de Weibull permet de calculer les paramètres de Weibull à différentes hauteurs afin d'étudier le potentiel énergétique à plusieurs hauteurs. Les paramètres de Weibull extrapolés sont calculés par :

$$c_{lat,lon}(h) = c_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^n \quad (3)$$

$$k_{lat,lon}(h) = k_0 \cdot \frac{1 - 0.088 \cdot \ln \left(\frac{h_0}{10} \right)}{1 - 0.088 \cdot \ln \left(\frac{h}{10} \right)} \quad (4)$$

Avec c_0, k_0 respectivement facteurs d'échelle et de forme de la distribution de Weibull à la hauteur h_0 . Les coefficients $c_{lat,lon}(h)$ et $k_{lat,lon}(h)$ représentent les paramètres de Weibull extrapolés à la hauteur h à une longitude et une latitude définie. Le coefficient n est calculé par :

$$n = \frac{0.37 - 0.088 \cdot \ln(C_0)}{1 - 0.088 \cdot \ln \left(\frac{h}{10} \right)} \quad (5)$$

2.2.3. Densité de puissance disponible

La densité de puissance disponible est donnée par [11], [12] :

$$P(v_{lat,lon}(h)) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_{lat,lon}(h)^3 \cdot \Gamma \left(\frac{k_{lat,lon}(h) + 3}{k_{lat,lon}(h)} \right) \quad (6)$$

Où Γ représente la fonction gamma définie par $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{(x-1)} \cdot \exp(-t) dt$. ρ représente la densité de masse de l'air dans la ZEE en kg/m^3 .

La densité de puissance disponible ainsi calculée dépend des coordonnées géographiques considérée dans la ZEE pour la hauteur h .

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN DANS LA ZEE DU BENIN A PLUSIEURS HAUTEURS

A partir de l'équation (6), on obtient la distribution spatiale de la densité de puissance disponible dans la ZEE du Bénin à 10 m. Cette distribution est présentée à la Fig. 3. L'analyse de cette figure montre que les densités de puissance disponible vers les latitudes extrêmes (6°N et

3°N) correspondent aux zones à fort potentiel pour une hauteur de 10 m.

En utilisant les formules d'extrapolation des paramètres de Weibull, on calcule les paramètres de Weibull à 80 m, 100 m et 120 m.

La Fig. 4 présente les isolines du potentiel énergétique éolien à 80 m dans la ZEE du Bénin. On remarque que le potentiel atteint une valeur 774,0906 W/m^2 par endroits. En se référant aux standards du NREL, un tel potentiel peut être rangé dans la classe 6. De plus on remarque que les valeurs maximales apparaissent autour de la latitude 6°N qui correspond à la côte. Aussi faut il remarquer que les lignes d'isopotential au voisinage des latitudes 3,5°N présentent aussi des valeurs très élevées. La Fig. 5 présente la distribution du potentiel éolien à 100 m dans la ZEE du Bénin. Sur cette figure, la densité de puissance disponible à 100 m de hauteur varie entre 769,6 W/m^2 et 949,2 W/m^2 . Les zones à fort potentiel sont situées vers la cote (près de la latitude 6,5°N) et en haute mer (près de la latitude 3°N). Se référant au standard du NREL [20], ce potentiel peut être rangé dans la classe 5 ($670 W \cdot m^{-2} \leq P \leq 820 W \cdot m^{-2}$). Cependant, il atteint la classe 6 ($820 W \cdot m^{-2} \leq P \leq 1060 W \cdot m^{-2}$) dans certaines parties de la ZEE. Selon le standard du NREL, un potentiel de class 5 est estimée comme une excellente source potentielle de production d'énergie électrique [18]. De même, une source de classe 6 est considérée comme ayant un potentiel exceptionnel pour la génération de l'énergie éolienne [18].

La distribution de la densité de puissance disponible à une hauteur de 120 m est présentée à la Fig. 6. Le potentiel éolien offshore au Bénin à 120 m varie entre 924,3 W/m^2 et 1233,5 W/m^2 . Se référant au standard de classification des sites éoliens du NREL, le potentiel éolien dans la ZEE est classé dans la classe 6 ($880 W \cdot m^{-2} \leq P \leq 1160 W \cdot m^{-2}$). Le potentiel atteint la classe 7 ($P \geq 1160 W \cdot m^{-2}$) dans les parties de la ZEE présentant les plus forts potentiels. En se référant à la classification des sites éoliens, un potentiel de classe 7 constitue le plafond en terme classification. De plus cette classe dite exceptionnelle convient parfaitement pour une production d'énergie électrique.

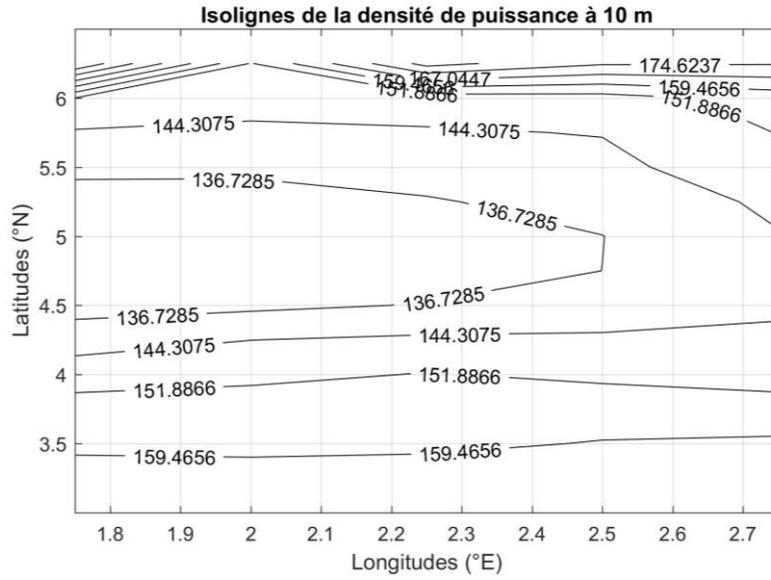


Fig. 3 : isolignes de la densité de la densité de puissance à 10 m de hauteur

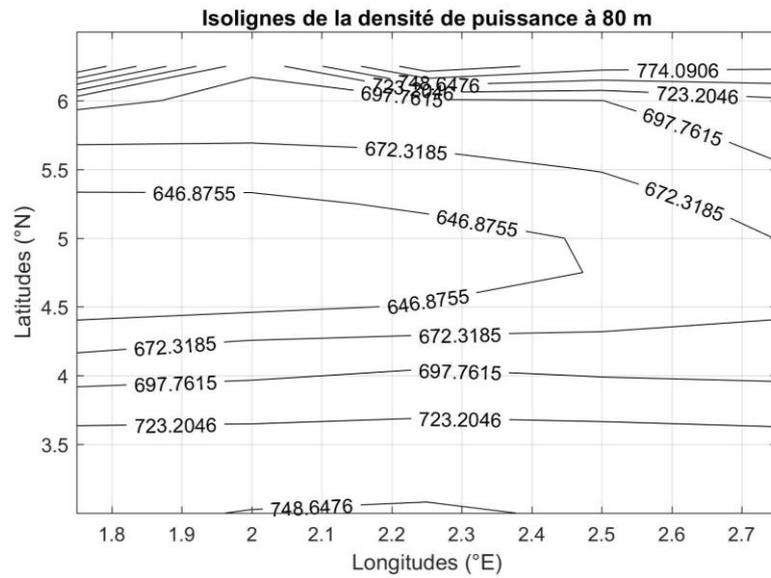


Fig. 4 : isolignes de la densité de puissance à 80 m dans la ZEE du Bénin

REMERCIEMENTS

Nous remercions tous les participants au 4^{ème} Colloque International Francophone d'Energétique et Mécanique, et espérons que vous apprécierez votre séjour au Bénin.

REFERENCES

- [1] L. Hong and B. Möller, "Offshore wind energy potential in China: Under technical, spatial and economic constraints," *Energy*, vol. 36, no. 7, pp. 4482–4491, Jul. 2011.
- [2] I. Blanco, "The economics of wind energy," vol. 13, pp. 1372–1382, 2009.
- [3] A. Colmenar-Santos, J. Perera-Perez, D. Borge-Diez, and C. dePalacio-Rodríguez, "Offshore wind energy: A review of the current status, challenges and future development in Spain," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 1–18, Oct. 2016.
- [4] M. Dicorato, G. Forte, M. Pisani, and M. Trovato, "Guidelines for assessment of investment cost for offshore wind generation," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 2043–2051, Aug. 2011.
- [5] C. Mattar and M. C. Guzmán-Ibarra, "A techno-economic assessment of offshore wind energy in Chile," *Energy*, vol. 133, pp. 191–205, Aug. 2017.
- [6] G. Nagababu, S. S. Kachhwaha, and V. Savsani, "Estimation of technical and economic potential of offshore wind along the coast of India," *Energy*, vol. 138, pp. 79–91, Nov. 2017.
- [7] "Unclos and Agreement on Part XI - Preamble and frame index." [Online]. Available: https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/closindx.htm. [Accessed: 16-Aug-2017].
- [8] "Chronological lists of ratifications of, accessions and successions to the Convention and the related Agreements." [Online]. Available: https://www.un.org/Depts/los/reference_files/chronological_lists_of_ratifications.htm. [Accessed: 16-Aug-2017].
- [9] Flanders Marine Institute, "Maritime Boundaries Geodatabase: Maritime Boundaries and Exclusive Economic Zones (200NM)." VLIZ, 2016.
- [10] "seawinds." [Online]. Available: <ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/seawinds/SI/uv/daily/netcdf/2000s/>. [Accessed: 08-Jun-2017].
- [11] M. S. Adaramola, M. Agelin-chaab, and S. S. Paul, "Assessment of wind power generation along the coast of Ghana," *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, no. 2014, pp. 61–69, 2015.
- [12] S. O. Oyedepo, M. S. Adaramola, and S. S. Paul, "Analysis of wind speed data and wind energy potential in three selected locations in south-east Nigeria," pp. 1–11, 2012.
- [13] C. N. Awanou, J. M. Degbey, and E. Ahlonsou, "Estimation of the mean wind energy available in Benin (Ex Dahomey)," *Renew. Energy*, vol. 1, no. 5–6, pp. 845–853, 1991.
- [14] T. Chang, Y. Wu, and H. Hsu, "Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan," vol. 28, pp. 851–871, 2003.
- [15] M. Mirhosseini, F. Sharifi, and A. Sedaghat, "Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 449–459, 2011.
- [16] G. A. Tolessa, "Assessment of wind power Potential at Zeway , Central Rift Valley," vol. 2, no. 4, pp. 11–18, 2013.
- [17] S. Mohammed, A. Benmansour, N. Ghellai, M. Benmedjahed, M. Abdellatif, and T. Hellal, "Temporal assessment of wind energy resource at four locations in Algerian Sahara," *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 654–664, 2013.
- [18] A. Allouhi *et al.*, "Evaluation of wind energy potential in Morocco's coastal regions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 311–324, May 2017.
- [19] G. Amirinia, S. Mafi, and S. Mazaheri, "Offshore wind resource assessment of Persian Gulf using uncertainty analysis and GIS," *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 915–929, Dec. 2017.
- [20] K.-Y. Oh, J.-Y. Kim, J.-K. Lee, M.-S. Ryu, and J.-S. Lee, "An assessment of wind energy potential at the demonstration offshore wind farm in Korea," *Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 555–563, Oct. 2012.
- [21] E. S. Takle and J. M. Brown, "Note on the Use of Weibull Statistics to Characterize Wind-Speed Data," *J. Appl. Meteorol.*, vol. 17, no. 4, pp. 556–559, Apr. 1978.
- [22] J. V. Seguro and T. W. Lambert, "Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis," vol. 85, 2000.
- [23] S. Vela, "A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis Case studies in the Canary Islands," vol. 13, pp. 933–955, 2009.