

ÉVALUATION DU POTENTIEL ÉOLIEN ET CHOIX D'UNE TECHNOLOGIE ÉOLIENNE DANS L'OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE : CAS DE LA RÉGION DU TONPKI

Souleymane TUO^{1*}, Daouda KONÉ^{1,2},
Kolotioloma Alama COULIBALY⁴, Ismael TOURÉ¹,
Josée N'gbesso YAO¹, Abé Simon YAPI² et Kouakou Bernard DJÈ³

¹ Université de Man (U-Man), Département des Sciences et Technologies,
Laboratoire Central d'Analyse, BP 20 Man, Côte d'Ivoire

² Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB), UFR des Sciences de la
Matière et de Technologie, Laboratoire de Technologie, BP V 34 Abidjan 01,
Côte d'Ivoire

³ Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et
Météorologique (SODEXAM), Direction de la Météorologie Nationale,
Département de la climatologie et applications météorologiques,
15 BP 990 Abidjan 15, Côte d'Ivoire

⁴ Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB), UFR Sciences de l'Homme et
de la Société, Institut de Géographie Tropicale, BP V 34 Abidjan 01,
Côte d'Ivoire

(reçu le 02 Novembre 2023; accepté le 15 Décembre 2023)

* Correspondance, e-mail : souleymane.tuo@univ-man.edu.ci

RÉSUMÉ

Le but de cette étude est de quantifier la ressource énergétique éolienne dans la région du Tonkpi à l'Ouest de la Côte d'Ivoire et de proposer une turbine éolienne adaptée au site. L'étude a été faite à partir des données de vent collectées à 10 m du sol à la station météorologique de Man sur une période allant de 2016 à 2020. La distribution de Weibull a été utilisée pour modéliser la vitesse moyenne du vent à 10 m. En plus, un modèle mathématique décrivant la variation de la vitesse suivant le profil vertical a été utilisé pour évaluer la puissance éolienne à différentes hauteurs du sol. Les résultats montrent qu'à 250 m de hauteur, la vitesse moyenne du vent et la densité de puissance éolienne annuelle sont respectivement de 2,39 m/s et 8,06 w/m². En outre, les vents dominants de vitesse moyenne 0,5 à 2,1 m/s sont de secteur Sud-Ouest avec une fréquence de 47,91 %. Le vent dans cette région du Tonkpi est relativement faible. Toutefois, en altitude, la puissance de vent devient importante. Les turbines de technologie nouvelle dont la vitesse de démarrage proche de 2 m/s peuvent être proposées dans cette région.

Mots-clés : Région de Tonkpi, vent, vitesse, direction, énergie éolienne, densité de puissance, turbine éolienne.

ABSTRACT

Assessment of wind potential energy and choice of wind turbine in Western Côte d'Ivoire : case of Tonpki region

The aim of this study is to quantify the wind energy resource in the Tonpki region in western of Côte d'Ivoire and to propose a wind turbine adapted for the site. The study was carried out using wind data collected at 10 m from the ground at the Man meteorological station over a period from 2016 to 2020. The Weibull distribution was used to model the average wind speed at 10 m. In addition, a mathematical model describing the variation of the speed along the vertical profile was used to evaluate the wind power at different heights from the ground. The results show that at 250 m height, the average wind speed and annual wind power density are respectively 2.39 m/s and 8.06 W/m². Then, the wind dominant directions with average 0.5 to 2.1 m/s are from South-West with a frequency of 47.91 %. The wind in this region of Tonpki is relatively weak. However, in altitude, the wind power becomes significant. New technologies turbines with a start-up speed around 2 m/s can be use in this region.

Keywords : *Tonpki region, wind, speed, direction, wind energy, power density, wind turbines.*

I - INTRODUCTION

L'épuisement progressif des ressources énergétiques traditionnelles (pétrole, nucléaire, charbon, et gaz naturel) et le renchérissement des coûts pétroliers ont accordé un intérêt particulier au développement de nouvelles sources d'énergies [1]. L'accès à l'énergie reste incessamment un défi majeur pour le bien-être des populations et le développement du secteur industriel [2]. L'exploitation en grande échelle des énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) depuis des décennies, pour soutenir la croissance mondiale, intensifie le réchauffement et le dérèglement climatique causant des catastrophes naturelles plus fréquentes et plus violentes [3, 4]. L'énergie nucléaire présentée comme moins polluante concernant les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère [5, 6], constitue par ailleurs, un véritable risque d'accident nucléaire. En plus, le traitement et l'enfouissement des déchets radioactifs demeurent des défis réels. Toutefois, les énergies renouvelables offrent des perspectives prometteuses pour renforcer la production énergétique (mix énergétique). Elles permettent d'abord de lutter contre la désertification, ensuite de limiter les impacts du changement climatique et enfin de favoriser l'électrification rurale [7 - 11]. L'un des défis de la Côte d'Ivoire et même de la sous-région, serait l'exploration des sources

d'énergies renouvelables afin de procéder à leur valorisation comme approche de solutions à la crise énergétique et écologique [12 - 15]. Dans cette logique, lors de la COP 21 de Paris en 2015, la Côte d'Ivoire s'est engagée à réduire la part des énergies fossiles des centrales thermiques à gaz dans sa production d'électricité passant d'environ 80 % en 2015 à environ 60 % à l'horizon 2030 [16]. Pour tenir ses engagements, la Côte d'Ivoire investit massivement dans la construction de nouvelles centrales à énergies renouvelables notamment, des centrales hydroélectrique, solaire photovoltaïque et biomasse [17]. Cependant, ces investissements sont quasi inexistantes concernant l'énergie éolienne. Alors que le pays dispose d'atouts importants puisqu'il est soufflé, au cours de l'année, par deux grands vents que sont la mousson et l'harmattan [18, 19]. Notons que très peu d'études sont disponibles concernant la quantification de la ressource éolienne en Côte d'Ivoire. Tout récemment, Mariam et al, ont exploité les données satellitaires pour évaluer la ressource éolienne dans la région de l'ouest de la Côte d'Ivoire [20]. Ils ont montré que la puissance éolienne est plus importante aux sommets des montagnes qu'au sol. Néanmoins, leur étude n'a pas permis de déterminer un dimensionnement approprié pour les éoliennes dans cette localité. Or, une telle connaissance constitue une étape importante pour la sélection des aérogénérateurs et le développement de l'énergie éolienne. Cette étude emploie un modèle mathématique de vent basé sur le principe d'extrapolation pour l'évaluation de la ressource éolienne en hauteur. C'est une contribution qui vise à quantifier la ressource énergétique éolienne disponible afin de dimensionner des aérogénérateurs pour l'implantation de centrale éolienne dans la région du Tonkpi à l'Ouest de la Côte d'Ivoire.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Présentation de la zone d'étude

La région du Tonkpi située à l'ouest de la Côte d'Ivoire a pour chef-lieu, la ville de Man. C'est une ville touristique dont l'agriculture, l'industrie minière et le commerce sont les activités majeures. La ville de Man est située en 7°19'60'' de latitude Nord et 7°25'00'' de longitude Ouest. La végétation est composée de forêts denses. C'est une région montagneuse dont les sommets des montagnes atteignent parfois 1000 m d'altitude [21]. La *Figure 1* présente la localisation de la région du Tonkpi en Côte d'Ivoire.



Figure 1 : Localisation géographique de la ville de Man (région du Tonpki) en Côte d'Ivoire [22]

II-2. Matériel de vent

L'équipement de mesure de vent est constitué d'une girouette et d'un anémomètre à coupelles à 10 mètres du sol est utilisée par la SODEXAM à la station synoptique de Man - aéroport pour la mesure des paramètres de vent (vitesse et direction). Les données sont collectées de manière tri-horaire. Les paramètres de vent sont déterminés sur une période de cinq ans allant de 2016 à 2020.

II-3. Matériel d'aérogénérateur

Le défi est de trouver des technologies d'aérogénérateurs appropriées pour une productivité optimale d'énergie éolienne. Le choix d'une technologie éolienne est basé essentiellement sur la vitesse de démarrage, la vitesse d'arrêt et la puissance nominale de l'éolienne (aérogénérateur). Il s'agira de choisir l'aérogénérateur offrant le maximum de puissance à partir de cette vitesse de démarrage avec un meilleur coefficient de puissance. Le choix se fera parmi les cinq éoliennes commerciales de la marque Enercon. Le *Tableau 1* donne les caractéristiques techniques des cinq turbines.

Tableau 1 : Données techniques des (05) cinq turbines ENERCON [37 - 41]

Modèle turbine (Enercon)	Vitesse démarrage (m/s)	Vitesse nominale (m/s)	Vitesse coupure (m/s)	Puissance nominale (kw)	Hauteur du mât (m)	Diamètre rotor (m)
E 82-2 MW	2	12,5	34	2000	78/85/98/108/138	82
E 92-2,35 MW	2	14	25	2350	78/84/85/98/104/108/138	92
E 115-2,5 MW	3	12	34	2500	92,5/149	115,0
E 115-3 MW	2	11,5	25	3000	92/135/149	115,7
E 82-2,35 MW	3	12	34	2300	78/85/98/108/138	82

II-4. Méthodes d'estimation du potentiel éolien

II-4-1. Extrapolation de la vitesse du vent

Sur un terrain plat et avec une stratification atmosphérique neutre, la vitesse du vent peut être extrapolée verticalement par une loi logarithmique. La valeur de la vitesse V_2 du vent disponible à une hauteur h_2 par rapport à la vitesse de référence V_1 du vent à une hauteur h_1 est donnée par la **Relation** ci-dessous [23, 24], z_0 étant la longueur des rugosités en surface dans la localité d'étude.

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (1)$$

II-4-2. Distribution de probabilité de la vitesse du vent

La distribution de Weibull a été utilisée pour exprimer la distribution de probabilité de la vitesse du vent, puisqu'elle donne un bon accord avec les données expérimentales [25 - 27]. La fonction de distribution de Weibull est une fonction exponentielle à deux paramètres. Elle permet de déterminer la distribution fréquentielle du vent sur une période donnée dans une localité. Les deux paramètres qui composent la distribution de Weibull sont le paramètre d'échelle c (m/s) qui renseigne sur la vitesse moyenne du vent caractéristique du site, et le paramètre de forme k (sans unité) qui caractérise la dissymétrie de la distribution de fréquence. La fonction de densité de probabilité de Weibull $f_w(V)$ est donnée par l'expression mathématique suivante [28 - 30] :

$$f_w(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

Les paramètres k et c sont déterminés par les **Équations** suivantes [31] :

$$k = \left(\frac{\sigma}{\underline{V}}\right)^{-1,089} \quad (3)$$

$$c = \frac{\underline{V}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (4)$$

avec, \underline{V} la vitesse moyenne ; σ l'écart type. $\Gamma(x)$ est une fonction mathématique dont l'expression est définie ainsi :

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (5)$$

II-4-3. Densité de puissance moyenne

La densité de puissance éolienne disponible sur un site, exprimée en (W/m^2) est donnée par la **Relation** suivante [30] :

$$P_{disponible} = \frac{1}{2} \rho \underline{V}^3 \quad (6)$$

ρ étant la densité de l'air et \underline{V} étant la vitesse moyenne du vent.

La densité de puissance éolienne maximale récupérable sur un site est donnée dans les limites de Betz en fonction des paramètres de Weibull par la **Relation** suivante [32, 33] :

$$P_{récupérable} = \frac{8}{27} \rho C_p^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right) \quad (7)$$

C_p étant le coefficient de puissance (le rendement) de la turbine éolienne, son expression mathématique est donnée ci-dessous [23, 34] :

$$C_p = \frac{P_{récupérable}}{P_{disponible}} \quad (8)$$

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

III-1. Variation saisonnière du vent

La **Figure 2** présente l'évolution mensuelle des vitesses moyennes (v) de vent. D'une année à une autre, la vitesse du vent varie très peu. Les vitesses du vent sont largement supérieures à 1 m/s entre Février et Septembre. Cependant, entre les mois de Novembre à Janvier, la vitesse du vent est faible. Cette différence de la vitesse mensuelle du vent peut être due aux variations saisonnières du climat dans la région.

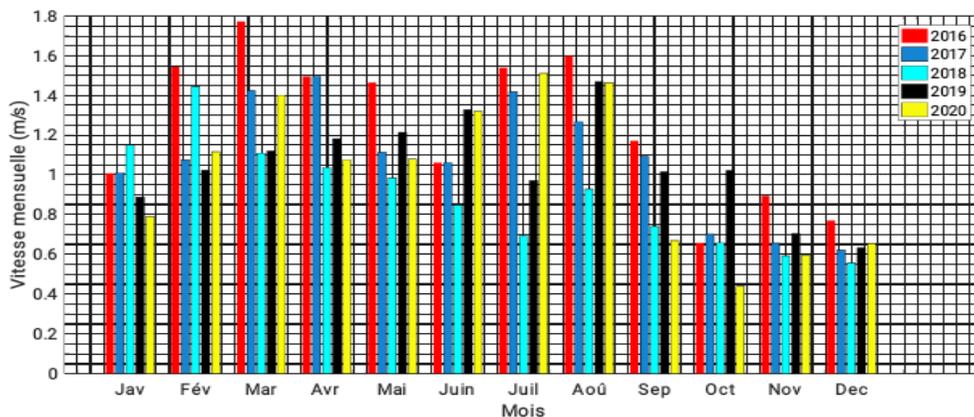


Figure 2 : Variation annuelle de la vitesse moyenne du vent à Man (période 2016 - 2020)

Le climat en Côte d'Ivoire est régulé par le mouvement Nord/Sud du front intertropical (FIT). Le FIT représente une convergence de deux vents soufflant en direction opposée. Il s'agit de l'harmattan et de la mousson [19, 35]. L'harmattan est un vent chaud et sec venant des régions sahéliennes alors que la mousson plus humide est océanique. Ainsi, selon la prédominance de chaque type de vent dans le pays, une localité peut être soumise aux effets de la mousson ou de l'harmattan. La mousson est pluvieuse tandis que l'harmattan favorise l'implantation de la saison sèche. Ces deux saisons sont caractérisées par des différences notables de la température et de la quantité de pluie journalière. Ainsi, en pleine saison sèche entre les mois de Novembre et Février, les températures mensuelles varient de 18 à 35°C, alors qu'en saison de pluie de Mars à Octobre, elles fluctuent en moyenne entre 22 et 35°C [18]. La **Figure 2** montre que la vitesse du vent est plus élevée en saison pluvieuse qu'en saison sèche. La mousson est un vent humide et dense. Ce vent, avec une vitesse plus importante contient une plus forte énergie. Toutefois, cette énergie semble faible pour favoriser l'implantation d'éolienne dans la région.

III-2. Distribution du vent à 10 m de hauteur

Les **Figures 3 et 4** représentent respectivement la rose de vent et la distribution de Weibull du vent à 10 m du sol.

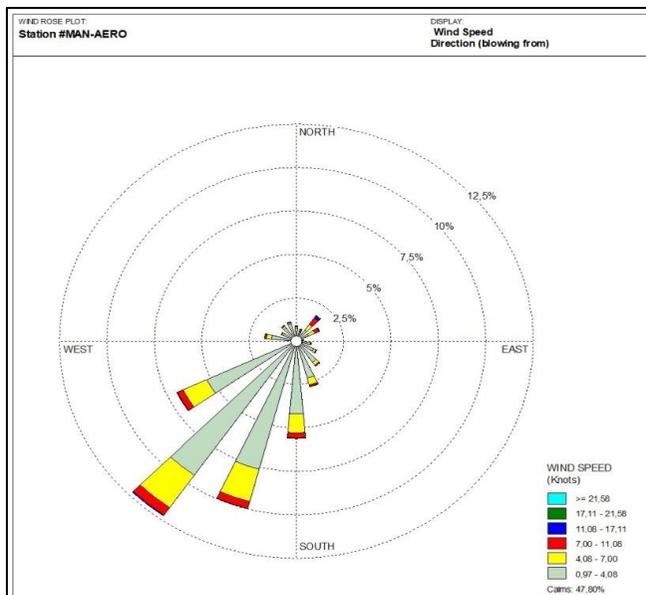


Figure 3 : Rose des vents (période 2016-2020)

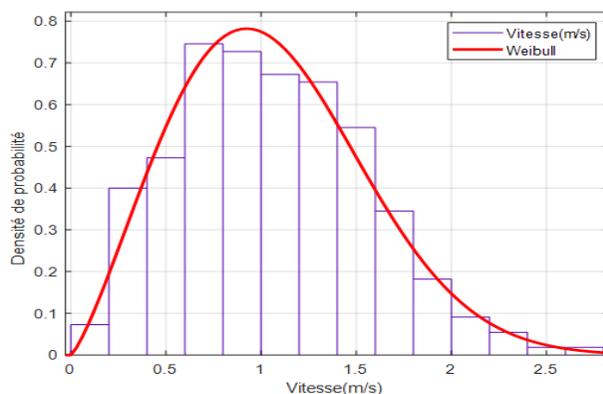


Figure 4 : Distribution de Weibull des données du vent au sol (période 2016 -2020)

L'analyse de la distribution des vents dans cette zone d'étude fait ressortir la présence de vents relativement calmes, de classe (0,5 à 2,1 m/s). Il y'a une prédominance de la direction moyenne Sud-Ouest ($248,1^\circ$) tout au long de la période d'étude (**Figure 3**). Cette classe de vent a une fréquence de distribution de 47,91 %. Un résultat similaire a été présenté ailleurs [36]. Par ailleurs ces résultats sont en conformité avec ceux obtenus par [20] dans la même zone d'étude. La distribution de Weibull ($k = 2,5$ et $c = 1,2$), présentée dans la **Figure 4**, montre une vitesse de vent comprise entre 0 et 2,5 m/s. Les vents qui ont une forte probabilité de se produire sont les vents de vitesse autour de 1 m/s. Cette probabilité vaut environ 0,7. Ces résultats montrent

qu'il est quasi impossible d'installer des turbines éoliennes à 10 m du sol dans cette zone d'étude puisque les turbines éoliennes ont une vitesse de démarrage minimale de 2 m/s [37 - 41].

III-3. Estimation de la puissance éolienne suivant le profil vertical

La **Figure 5** illustre la variation de la vitesse en fonction de la hauteur. L'analyse de cette figure montre que la vitesse du vent augmente avec l'altitude. La vitesse du vent passe d'environ 1,85 m/s à 50 m du sol pour atteindre 2,39 m/s à 250 m. En basse altitude, le vent est fortement freiné par des obstacles et par des accidents de terrains [23]. La région ouest de la Côte d'Ivoire est en effet une zone boisée avec de nombreuses montagnes qui constituent une barrière naturelle limitant la circulation du vent. Cela a pour conséquence de réduire non seulement la puissance éolienne disponible mais aussi la puissance récupérable, telles que montrée dans la **Figure 6**.

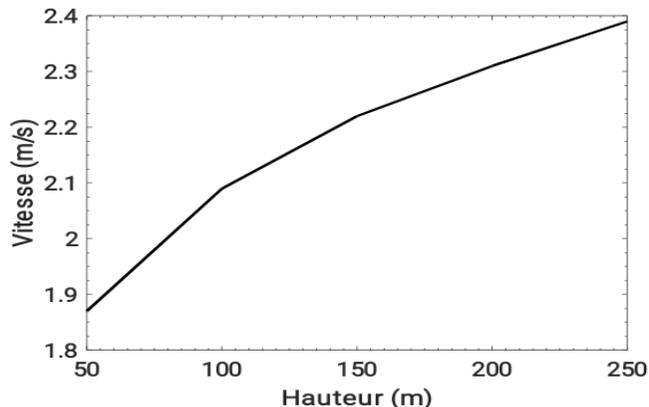


Figure 5 : Profil vertical de la vitesse du vent

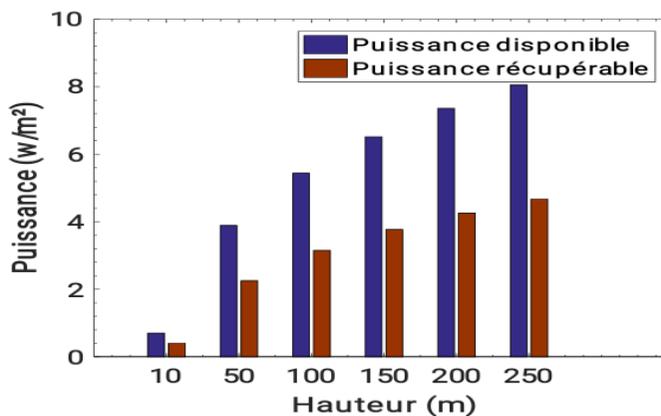


Figure 6 : Variation de la densité de puissance

La densité de puissance moyenne disponible évolue de 0,7 à 8,06 W/m² suivant les hauteurs allant de 10 à 250 m respectivement. Ainsi, les puissances maximales récupérables évoluent respectivement de 0,4 à 4,77 W/m² pour les mêmes altitudes. Par conséquent, la densité de puissance croît avec l'augmentation de la hauteur. Un tel résultat montre également que la hauteur des aérogénérateurs doit être élevée pour pouvoir extraire le maximum d'énergie du site. Ces hauteurs peuvent être atteintes en exploitant les sommets des nombreuses montagnes, buttes et collines de la région du Tonkpi.

III-4. Choix d'une technologie d'aérogénérateur

La **Figure 7** montre l'évolution de la puissance et du coefficient de puissance de chaque éolienne en fonction de la vitesse disponible. La puissance et le coefficient de puissance (C_p) augmentent avec la vitesse. Le démarrage s'effectue autour de 2 m/s. Ensuite, le C_p et la puissance croissent pour atteindre chacune leur maximum lorsque la vitesse est comprise entre 7 et 12 m/s. Au-delà de la vitesse de 12 m/s, le coefficient C_p décroît tandis que la puissance atteint sa limite. Ceci est visible pour toutes les éoliennes considérées. Ainsi, pour chaque turbine, la puissance éolienne n'augmente plus tandis que le coefficient de puissance diminue jusqu'à s'annuler. Cela traduit l'arrêt de la turbine pour des mesures de sécurité.

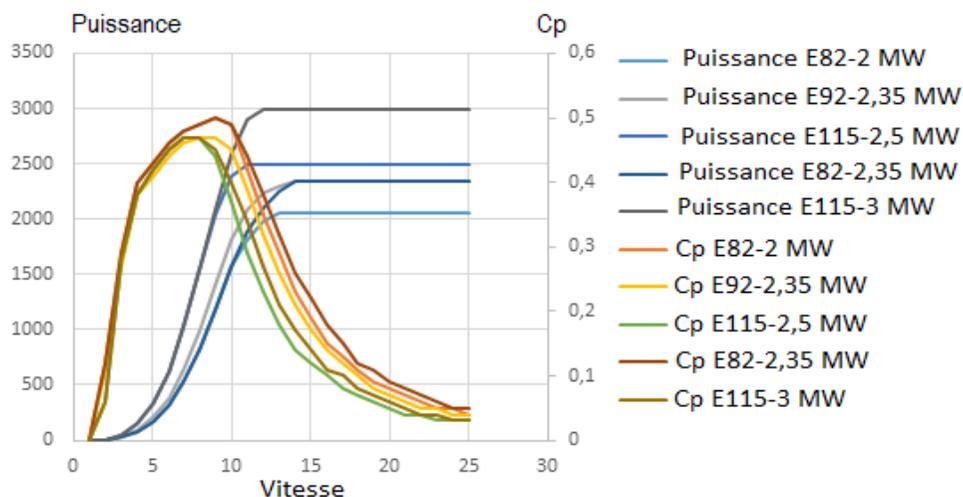


Figure 7 : Courbes de puissance et coefficient de puissance

Toutes les turbines produisent de la puissance à partir de 2 m/s. En plus, la **Figure 7** indique que chaque turbine atteint sa puissance maximale et son meilleur rendement pour des vitesses comprises entre 7 et 12 m/s. Les résultats de la **Figure 5** confirment que la vitesse disponible permet le

démarrage des éoliennes (E 82, E 92 et E 115), mais qu'elle ne leur permet pas d'atteindre la pleine puissance. Ce résultat montre la nécessité d'exploiter le sommet des montagnes pour disposer de plus de puissance dans la zone Ouest de la Côte d'Ivoire.

IV - CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'évaluer le potentiel éolien en hauteur par l'emploi de modèle mathématique d'extrapolation dans le but de dimensionner et de sélectionner des aérogénérateurs appropriés pour une production d'énergie éolienne dans la zone ouest de la Côte d'Ivoire. Les analyses des données de vent à 10 m du sol montrent d'une part que les vents dominants sont les vents calmes de vitesse 0,5 à 2,1 m/s et d'autre part que la direction moyenne de ces vents est de secteur Sud-ouest. Les vents de vitesse autour de 1 m/s ont une forte probabilité de production qui est de 0,7. Ces vitesses de vent ne permettent pas le démarrage d'une turbine éolienne. Cependant, si la hauteur augmente, la densité de puissance disponible et celle récupérable par la turbine augmentent également. Cela permet l'implantation d'éolienne de type ENERCON par exploitation des hauts sommets des montagnes de la région.

RÉFÉRENCES

- [1] - GUGLIELMO MARIA CAPORALE, NICOLA SPAGNOLO, AWON ALMAJALI, "Economic Modelling", Vol. 123, (2023) 106273
- [2] - A. B. AKPO, J. C. T. DAMADA, H.E.V, DONNOU, B. KOUNOUHEWA et C. N. AWANOU, Evaluation de la production énergétique d'un aérogénérateur sur un site isolé dans la région côtière du Bénin, *revues des énergies renouvelables*, Vol. 18, N°3 (2015) 457 - 468
- [3] - LISE DESVALLÉES, Xavier Arnauld de Sartre, In the shadow of nuclear dependency : Competing pathways and the social acceptance of offshore wind energy in France, *Energy Research & Social Science*, Vol. 98, (April 2023) 10302
- [4] - A. SHEPHERD, S. ROBERTS, G. SÜNNENBERG, A. LOVETT, A. F. S. HASTINGS, Scotland's onshore wind energy generation, impact on natural capital & satisfying no-nuclear energy policy, *Energy Reports*, Vol. 7, (November 2021) 7106 - 7117 p.
- [5] - LIMIN LIU, HUI GUO, LIHONG DAI, MAOLONG LIU, YAO XIAO, TENGLONG CONG, HANYAN GU, The role of nuclear energy in the carbon neutrality goal, *Progress In Nuclear Energy*, Vol. 162, (August 2023) 104772

- [6] - MOHAMMAD HAKKAK, NURULLAH ALTINTAS, SUSAN HAKKAK, Exploring the relationship between nuclear and renewable energy usage, ecological footprint, and load capacity factor: A study of the Russian federation testing the EKC and LCC hypothesis, *Renewable Energy Focus*, Vol 46, (September 2023) 356 - 366 p.
- [7] - <https://www.mediaterre.org/afrique-ouest/actu,20091219200939.html>
- [8] - JEAN MULOPO, A mini-review of practical interventions of renewable energy for climate change in Sub-Saharan Africa in the last decade (2010–2020) : implications and perspectives, *Heliyon*, Vol. 8, Issue 11, (November 2022) e11296
- [9] - MD. MUSTAFA KAMAL, IMTIAZ ASHRAF, EUGEN FERANDEZ, Optimal sizing of standalone rural microgrid for sustainable electrification with renewable energy resources, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 88, (January 2023) 104298
- [10] - JEAN-LOUIS BAL, BERNARD CHABOT, Les énergies renouvelables. État de l'art et perspectives de développement, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, Vol 333, Issue 12, (31 December 2001) 827 - 834 p.
- [11] - VISHAKHA TANK, JIGNASHA BHUTKA, T. HARINARAYANA, *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol. 4, N°10 (October 2016)
- [12] - EBERHARD et R. NAUDE, Recommendations for the design of successful renewable energy auctions or competitive tenders in Africa, Graduate school of Business, University of Cape Town, doi: 10.13140/RG.2.2.29228.87684
- [13] - S. JAIN et P. K. JAIN, *Energy Procedia*, Vol. 143, (2017) 721 - 726 p.
- [14] - DAVID ALEMZERO, THEOPHILUS ACHEAMPONG, SUN HUAPING, "*Renewable Energy*", Vol. 179, (2021) 652 - 666 p.
- [15] - OMAR AL-NHOUD, MOHAMMAD AL-SMAIRAN, *Modern Mechanical Engineering*, Vol. 5, N°3 (August 2015)
- [16] - <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12333894.pdf>, consulté le 12/08/2023
- [17] - <https://www.cinergies.ci/test/notre-engagement-dans-la-transition-energetique-mix-energetique-energies-renouvelables-perspectives/>, consulté 29/11/23
- [18] - J. M. KOUAO, A. M. KOUASSI, S. C. DEKOULA, B. D. ASSEUFI, ANALYSIS OF THE CLIMATE REGIONALIZATION OF THE IVORY COAST IN A CHANGING CLIMATE CONTEXT, *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, N°41, (Mars 2020) 233 - 259 p.
- [19] - https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-12/16841.pdf, consulté le 05/12/23

- [20] - MARIAM TRAORE, SOULEYMANE TUO, DAOUDA KONE, JOSEE N'GBESSO YAO, KOLOTIOLOMA ALAMA COULIBALY et BOKO AKA, Evaluation du potentiel éolien dans la région montagneuse de Man, Côte d'Ivoire, par une étude comparative des données satellitaires et sur site de vent, *Afrique SCIENCE*, 23 (2) (2023) 38 - 49
- [21] - A. C. TIESSE, " Apport de la teledetection et des sig pour le suivi spatio- temporel de l'occupation du sol et la cartographie de la sensibilité à l'érosion hydrique dans la région montagneuse du tonkpi (ouest de la cote d'ivoire) ", Thèse unique, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, (2020) 198 p.
- [22] - <https://www.climatsetvoyages.com/climat/cote-d-ivoire/man>, consulté 05/12/23
- [23] - M. A. HOUKPOHEHA, B. KOUNOUHEWA, B.N. TOKPOHOZIN, N. AWANOU, Estimation de la puissance énergétique éolienne 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 (2014) 489 - 495
- [24] - BENEDICTE JOURDIER, Ressource éolienne en France métropolitaine : méthodes d'évaluation du potentiel, variabilité et tendances, Thèse Ecole polytechnique, Université Paris-Saclay, France, (2015) 228 p.
- [25] - A. DARWISH and A. SAYIGH, Wind energy potential in Iraq, *Solar technology and wind*, Vol. 5, N°3 (1988) 215 - 222 p.
- [26] - TBMJ OUARDA, C. CHARRON, J. Y. SHIN, PR. MARPU, AH. AL-MANDOOS, MH. AL-TAMIMI et al., Distributions de probabilité de la vitesse du vent aux Emirats arabes unis, conversion et gestion de l'énergie, 93 (2015) 414 - 434
- [27] - MR. ISLAM, R. SAIDUR et NA. RAHIM, Evaluation de la potentialité de l'énergie éolienne à Kudat et Labuan, Malaisie à l'aide de la fonction de distribution de Weibull, *énergie*, 36 (2011) 985 - 992
- [28] - C. G. JUSTUS, V. R. HARGRAVES, A. MIKHAIL and D. GRABER, Methods for estimating wind speed frequency distributions. *J. Appl. Meteorol.*, (1978) 350 - 353
- [29] - DIEUDONNÉ KAOGA KIDMO, BACHIROU BOGNO, KODJI DELI, DELI GORON, *Smart Grid and Renewable Energy*, Vol. 11, N°9 (September 2020)
- [30] - F. BOUKLI HACENE¹, N. KASBADJI MERZOUK² et L. LOUKARFI, Analyse statistique et élaboration d'un atlas éolien de la vallée du Cheliff, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10, N°4 (2007) 583 - 588

- [31] - PIERRE POKEM, ELIE BERTRAND KENGNE SIGNE, JEAN NGANHO, YAOUBA, *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol. 11, N°6 (2023)
- [32] - SAID DIAF, GILLES NOTTON, DJAMILA DIAF, Technical and economic assessment of wind farm power generation at Adrar in Southern Algeria, The Mediterranean Green Energy Forum 2013, MGEF-2013, *Energy Procedia*, 42 (2013) 53 - 62
- [33] - SAÏDOU MADOUYOU, Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, (2010) 148 p.
- [34] - 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 (2012) 4527 - 4536 p.
- [35] - JEAN-DENIS TAUPINA, GAËLLE GAULTIERB, GUILLAUME FAVREAU, CHRISTIAN LEDUCB, CHRISTELLE MARLINC, Variabilité isotopique des précipitations sahéliennes à différentes échelles de temps à Niamey (Niger) entre 1992 et 1999 : implication climatique, *C. R. Geoscience*, 334 (2002) 43 - 50
- [36] - S. MATHEW, K. P. PANDEY and KUMAR, A analysis of wind regimes for energy estimation. *Renewable energy*, Vol. 25, issue 3, (March 2002) 381 - 399 p.
- [37] - <https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/835-enercon-e-82-e2-2.000>, consulté le 23/12/23
- [38] - <https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/131-enercon-e-92>, consulté le 23/12/23
- [39] - <https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/427-enercon-e-115-2.500>, consulté le 23/12/23
- [40] - <https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/550-enercon-e-82-e2-2.300>, consulté le 23/12/23
- [41] - <https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/832-enercon-e-115-3.000>, consulté le 23/12/23