

Comparaison du potentiel énergétique éolien des trois zones climatiques du Tchad

Marcel Hamda Soulouknga ^{1,2}, Dieudonné Kidmo Kaoga ²,
Noël Djongyang ¹ et Serge Yamigno Doka ²

¹ Department of Renewable Energy, The Higher Institute of the Sahe
University of Maroua, P.O. Box 46 Maroua, Cameroon

² Department of Physics, Higher Teachers' Training College
University of Maroua, P.O. Box 55 Maroua, Cameroon

(reçu le 8 Janvier 2016 – accepté le 25 Mars 2016)

Résumé - *Au vu des potentiels énergétiques solaires, géothermiques et éoliens existants au Tchad, leurs utilisations pour le développement économique de certaines zones semblent favorables. Dans ce papier, les caractéristiques du vent sont analysées en utilisant les données de la vitesse du vent recueillies pour chacune des trois zones agro-climatiques du Tchad et disponibles pour au moins 19 ans (19 ans pour la Zone Saharienne, 21 ans pour la Zone Sahélienne et 21 ans pour la Zone Soudanienne). La distribution de Weibull est utilisée pour modéliser la vitesse du vent à ces trois zones du Tchad. Les paramètres de forme et d'échelle ont été estimés en utilisant la méthode de densité de puissance ou facteur d'énergie. L'objectif de cet article est de comparer les potentialités énergétiques éoliennes des trois zones du Tchad. Il a été observé que les paramètres de forme et d'échelle varient considérablement au cours d'un mois. Ainsi, ces paramètres pour les trois zones sont respectivement 3.746 et 3.598 m/s en Zone Saharienne, 4.233 et 3.572 m/s en Zone Sahélienne et 3.101 et 3.008 m/s en zone Soudanienne. On remarque que les zones les plus ventées sont les zones Saharienne et Sahélienne avec une vitesse moyenne du vent de l'ordre de 3.25 m/s. L'extrapolation de la vitesse du vent et des paramètres de Weibull augmente avec l'altitude et par conséquent, la densité de puissance également.*

Abstract - *In view of the solar, geothermal, and wind power potentials in Chad, their use for the economic development of certain areas seems beneficial. In this paper, the wind characteristics are analyzed using wind speed data that were collected in each of Chad's agro-climatic areas for at least 19 years (19 years for the Saharan area, 21 years for the Sahelian area, and 21 years for the Sudanese area). The Weibull distribution was used to model the wind speed in these three regions of Chad. The shape and scale parameters were estimated using the power density or energy factor method. The objective of this article is to compare the wind power potentials of the three regions in Chad. It was observed that the shape and scale parameters for the three areas varied greatly over a month. Thus, these parameters for the three areas were respectively 3.746 and 3.598 m/s in the Saharan zone, 4.233 and 3.572 m/s in the Sahelian zone, and 3.101 and 3.008 m/s in the Sudanese zone. We notice that the windiest areas are the Saharan and Sahelian areas with an average speed of 3.25 m/s. The extrapolation of the wind speed and Weibull parameters increases with altitude, consequently, the power density does too.*

Mots clés: Distribution de Weibull - Méthode de la densité de puissance - Energie éolienne – Extrapolation - Vitesse du vent.

1. INTRODUCTION

Le vent est un élément dont l'étude s'avère très complexe, sa caractérisation est fonction de plusieurs paramètres tels que la mesure de la vitesse du vent et de sa

direction, l'effet de la rugosité du sol, l'effet des obstacles, l'effet de la stabilité de l'atmosphère, etc. [17].

La connaissance des caractéristiques de la distribution de la vitesse du vent dans les sites d'implantation des projets éoliens est indispensable, non seulement pour l'évaluation du potentiel éolien et la sélection des sites favorables, mais également pour le dimensionnement des centrales éoliennes et le choix approprié des aérogénérateurs. Les fonctions d'ajustements les plus utilisées sont celles de Weibull et Rayleigh. Une attention particulière a été apportée à la loi de Weibull parce qu'il s'est avéré que cette méthode s'adapte beaucoup mieux pour la plupart des régimes de vent dans le monde [2, 4].

A 80% rural, avec une absence totale d'un réseau de transport d'électricité, le Tchad peut compter sur les Energies Renouvelables pour assurer sa production et son indépendance énergétique partout. Entre 2 à 4% de la population a accès à l'électricité. Or, l'énergie est un vrai moteur de développement au même titre que les ressources financières et humaines [18]. Malheureusement jusqu'à aujourd'hui, aucune recherche n'a fait de son évaluation en vue d'une exploitation.

Dans les trois zones climatiques du Tchad, la vitesse du vent est mesurée dans l'ensemble des stations d'observation météorologique depuis un certain nombre d'années. Dans cette étude, une analyse statistique des mesures de la vitesse du vent, basée sur la distribution de Weibull, est menée en vue d'étudier les possibilités qui peuvent être offertes par l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité ou pour le pompage d'eau.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Données de vent

Les données de cette étude viennent de la Division de la Climatologie ou de la Direction Générale de la Météorologie Nationale au Tchad, Juin 2014. Les mesures de la vitesse du vent sont faites à 10 m de hauteur. Les coordonnées géographiques des sites sont données au **Tableau 1**.

Tableau 1: Coordonnées géographiques des sites sélectionnés

Stations Zone	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Altitude (mg)	Période de mesure (an)	Hauteur du mât (m)
Saharienne	19.7	17.55	233	19(1960-1978)	10
Soudanienne	16.4	8.37	420	21(1990-2010)	10
Sahélienne	15.2	12.8	294	21(1990-2010)	10

2.2 Distribution de Weibull

Afin d'évaluer le potentiel de l'énergie éolienne d'un site, il est important d'exprimer la distribution de la fréquence de la vitesse du vent. La distribution de Weibull a été couramment utilisée, acceptée et recommandée dans la littérature pour exprimer la distribution de fréquence de la vitesse du vent. Elle s'est avérée non seulement appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent, mais donne un bon accord avec les données expérimentales [5]. La fonction de densité de probabilité de Weibull est donnée par [1, 7]:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

Où v est la vitesse du vent (m/s), k est un facteur de forme adimensionnel qui caractérise la distribution de fréquence et c est le facteur d'échelle qui a la dimension de la vitesse.

La détermination de k et c appelés paramètres de Weibull permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Une fois ces paramètres déterminés, la vitesse moyenne du vent est calculée selon l'expression suivante:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} v f(v) dv$$

La vitesse moyenne $\bar{V}$ et l'écart-type σ la distribution de Weibull valent alors:

$$\bar{V} = C \Gamma(1 + 1/K) \quad (2)$$

$$\sigma = c \cdot \left(\Gamma(1 - 2/k) - \Gamma^2(1 - 2/k) \right)^{1/2} \quad (3)$$

Γ représente la fonction gamma donnée comme suit:

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

$$\Gamma(x) = (\sqrt{2\pi x}) (x^{x-1}) (e^{-x}) \left(1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{288x^2} - \frac{1}{51840x^3} + \dots\right) \quad (4)$$

2.3 Méthode de la densité de puissance [10]

$$E_{pf} = \frac{\bar{V}^3}{\bar{V}^3} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3 \right) / \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{V}_i \right)^3 \quad (5)$$

$$k = 1 + 3.69 / (E_{pf})^2 \quad (6)$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^k \right)^{1/k} \quad (7)$$

n est le nombre de données de vitesses non nulles dans la série considérée; V_i est la vitesse du vent au temps i .

Ainsi, connaissant k , le paramètre d'échelle c peut être calculé

2.4 Extrapolation des paramètres de Weibull

L'extrapolation des paramètres de Weibull est obtenue par les relations suivantes [1, 7, 11],

$$c_z = c_{10} \times (z/z_{10})^n \quad (8)$$

$$k_z = k_{10} (1 - 0.088 \ln(z_{10}/10)) / (1 - 0.088 \ln(z/10)) \quad (9)$$

$$n = (0.37 - 0.088 \ln(c_{10}/10)) / (1 - 0.088 \ln(z_{10}/10)) \quad (10)$$

2.5 Extrapolation de la vitesse du vent

Généralement, les mesures de la vitesse du vent sont faites à 10 m d'altitude au-dessus de la surface de la terre. Il est toutefois nécessaire d'estimer la vitesse du vent à différentes altitudes. La vitesse du vent augmente avec l'altitude. L'extrapolation de la vitesse du vent pour différentes altitudes est obtenue par la relation suivante [12, 13].

$$V(z_2) = V(z_{10}) (z_2 / z_{10}) \quad (11)$$

α_1 , l'exposant de la loi de puissance qui est en fonction de la rugosité de surface donné par [14],

$$\alpha_1 = (0.37 - 0.088 \ln(v_{10})) / (1 - 0.088 \ln(z_{10}/10)) \quad (12)$$

2.6 Evaluation de la densité de puissance moyenne de l'énergie éolienne

La densité de puissance de l'énergie éolienne est la caractéristique la plus importante du vent. Elle représente la quantité d'énergie produite par le vent. Supposons que A soit une section transversale à travers laquelle le vent s'écoule perpendiculairement. La puissance du vent est donnée par la relation suivante [15, 16]:

$$P(v) = \frac{\rho \times v^3}{2} \times A \quad (13)$$

Avec ρ , la masse volumique de l'air qui dépend de la pression (altitude), de la température, et de l'humidité. Elle est supposée être constante puisque sa variation n'affecte pas le calcul de ressource du vent d'une manière significative [15, 16].

Dans cette étude, on utilise la masse volumique de l'air moyenne pour chaque site selon son altitude.

La densité de distribution de l'énergie éolienne donne la répartition de l'énergie éolienne à différentes vitesses du vent. Elle est obtenue en multipliant la densité de puissance du vent par la probabilité de chaque vitesse du vent comme suit:

$$\frac{P(v)}{A} \cdot f(v, k, c) = \frac{1}{2} \times \bar{\rho} \times v^3 \times f(v, k, c) \quad (14)$$

En intégrant l'équation (13) pour une période d'étude, on obtient la densité de puissance du vent moyenne:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \times \bar{\rho} \times \int_0^{\infty} v^3 \times f(v, k, c) \times dv = \frac{1}{2} \times \bar{\rho} \times c^3 \times \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (15)$$

3. RESULTATS

Tableau 2: Différents résultats de Weibull pour chaque zone climatique du Tchad

Tableau 2a: Zone Saharienne

Mois	V_{weibull} (m/s)	σ_{weibull} (m/s)	C_{weibull} (m/s)	K_{weibull}	P (W/m ²)
Janvier	4.0	1.185	4.426	3.782	48.248
Février	3.8	1.150	4.211	3.681	41.814
Mars	3.7	1.338	4.142	3.014	42.455
Avril	3.3	0.942	3.645	3.914	26.754
Mai	2.9	0.888	3.217	3.625	18.713
Juin	2.7	0.800	2.988	3.767	14.858

To be continue

Mois	V_{weibull} (m/s)	σ_{weibull} (m/s)	C_{weibull} (m/s)	K_{weibull}	P (W/m ²)
Juillet	2.3	0.703	2.551	3.638	9.323
Août	2.2	0.686	2.442	3.567	8.219
Septembre	3.0	0.936	3.331	3.563	28.942
Octobre	3.4	0.950	3.749	4.036	28.942
Novembre	3.9	1.050	4.291	4.186	43.128
Décembre	3.8	1.023	4.181	3.767	39.903
Moyenne	3.25	0.971	3.598	3.746	28.602

Tableau 2b: Zone Sahélienne

Mois	V_{weibull} (m/s)	σ_{weibull} (m/s)	C_{weibull} (m/s)	K_{weibull}	P (W/m ²)
Janvier	3.6	0.890	3.939	4.615	32.738
Février	4.0	1.076	4.400	4.201	46.202
Mars	4.2	1.068	4.603	4.473	52.433
Avril	3.2	0.913	3.534	39.22	24.231
Mai	3.2	0.837	3.515	4.305	23.468
Juin	3.6	0.873	3.935	4.681	32.589
Juillet	3.2	0.829	3.512	4.376	23.355
Août	2.5	0.686	2.754	4.088	11.380
Septembre	2.4	0.658	2.644	4.102	10.064
Octobre	2.4	0.756	2.666	3.522	10.669
Novembre	3.3	0.847	3.620	4.415	25.546
Décembre	3.4	0.933	3.745	4.099	28.603
Moyenne	3.25	0.864	3.572	4.233	26.773

Tableau 2c: Zone Soudanienne

Mois	V_{weibull} (m/s)	σ_{weibull} (m/s)	C_{weibull} (m/s)	K_{weibull}	P (W/m ²)
Janvier	3.1	0.956	3.439	3.612	22.462
Février	3.3	1.120	3.681	3.245	28.439
Mars	3.1	1.045	3.458	3.254	23.556
Avril	3.3	1.244	3.702	2.875	30.382
Mai	2.9	1.045	3.245	3.034	19.985
Juin	2.8	0.975	3.128	3.144	17.651
Juillet	2.7	0.898	3.009	3.314	15.425
Août	2.3	0.919	2.586	2.699	10.694
Septembre	2.1	0.750	2.349	3.059	7.555
Octobre	2.0	0.888	2.256	2.398	7.650
Novembre	2.1	0.715	2.344	3.221	7.363
Décembre	2.6	0.854	2.895	3.361	13.676
Moyenne	2.69	0.951	3.008	3.101	17.070

Tableau 3: Extrapolation des vitesses du vent et des paramètres de Weibull à 15, 20, 30 et 50 m d'altitude pour les trois zones climatiques

Tableau 3a: Zone SaharienneExtrapolation de la vitesse du vent (V)

Mois	Janv.	Fev.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
10 m	4.000	3.800	3.700	3.300	2.900	2.700	2.300	2.200	3.000	3.400	3.900	3.800
15 m	4.423	4.209	4.103	3.674	3.244	3.028	2.594	2.485	3.351	3.781	4.316	4.209
20 m	4.738	4.515	4.403	3.954	3.502	3.274	2.816	2.701	3.615	4.067	4.626	4.515
30 m	5.207	4.970	4.852	4.374	3.891	3.648	3.153	3.029	4.012	4.494	5.089	4.970
50 m	5.840	5.587	5.459	4.944	4.421	4.156	3.618	3.481	4.553	5.074	5.714	5.587

Extrapolation du paramètre c

Mois	Janv.	Fev.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
10 m	4.426	4.211	4.142	3.645	3.217	2.988	2.551	2.442	3.331	3.749	4.291	4.181
15 m	4.876	4.648	4.574	4.044	3.585	3.338	2.866	2.748	3.707	4.155	4.733	4.616
20 m	5.210	4.972	4.896	4.341	3.861	3.602	3.104	2.979	3.989	4.458	5.061	4.939
30 m	5.707	5.455	5.374	4.786	4.274	3.997	3.464	3.329	4.411	4.910	5.549	5.420
50 m	6.375	6.106	6.019	5.389	4.837	4.537	3.957	3.810	4.985	5.522	6.206	6.068

Extrapolation du paramètre k

Mois	Janv.	Fev.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
10 m	3.782	3.681	3.014	3.914	3.625	3.767	3.638	3.567	3.563	4.036	4.186	4.181
15 m	3.922	3.817	3.126	4.059	3.759	3.906	3.773	3.699	3.695	4.185	4.341	4.336
20 m	4.024	3.917	3.207	4.164	3.857	4.008	3.871	3.795	3.791	4.294	4.454	4.449
30 m	4.173	4.062	3.326	4.319	4.000	4.157	4.014	3.936	3.931	4.453	4.619	4.613
50 m	4.370	4.253	3.482	4.522	4.188	4.352	4.203	4.121	4.117	4.663	4.837	4.831

Tableau 3b: Zone SahélienneExtrapolation de la vitesse du vent (V)

Mois	Janv.	Fev.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
10 m	3.939	4.400	4.603	3.534	3.515	3.935	3.512	2.754	2.644	2.666	3.620	3.745
15 m	4.358	4.849	5.064	3.925	3.905	4.354	3.901	3.086	2.967	2.991	4.017	4.151
20 m	4.670	5.182	5.406	4.217	4.196	4.665	4.192	3.336	3.211	3.236	4.313	4.453
30 m	5.135	5.677	5.914	4.654	4.631	5.130	4.628	3.713	3.578	3.605	4.757	4.905
50 m	5.763	6.342	6.595	5.246	5.222	5.758	5.218	4.228	4.081	4.111	5.357	5.516

Extrapolation du paramètre c

Mois	Janv.	Fev.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
10 m	3.939	4.400	4.603	3.534	3.515	3.935	3.512	2.754	2.644	2.666	3.620	3.745
15 m	4.358	4.849	5.064	3.925	3.905	4.354	3.901	3.086	2.967	2.991	4.017	4.151
20 m	4.670	5.182	5.406	4.217	4.196	4.665	4.192	3.336	3.211	3.236	4.313	4.453
30 m	5.135	5.677	5.914	4.654	4.631	5.130	4.628	3.713	3.578	3.605	4.757	4.905
50 m	5.763	6.342	6.595	5.246	5.222	5.758	5.218	4.228	4.081	4.111	5.357	5.516

Extrapolation du paramètre k

Mois	Janv.	Fev.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
10 m	4.615	4.201	4.473	3.922	4.305	4.681	4.376	4.088	4.102	3.522	4.415	4.099
15 m	4.786	4.357	4.639	4.067	4.464	4.854	4.538	4.239	4.254	3.652	4.579	4.251
20 m	4.910	4.470	4.759	4.173	4.581	4.981	4.656	4.350	4.365	3.747	4.698	4.361
30 m	5.092	4.635	4.936	4.328	4.750	5.165	4.829	4.511	4.526	3.886	4.872	4.523
50 m	5.332	4.854	5.168	4.532	4.974	5.409	5.056	4.723	4.740	4.069	5.101	4.736

Tableau 3c: Zone Soudanienne

Extrapolation de la vitesse du vent (V)

Mois	Janv.	Fev.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
10 m	3.100	3.300	3.100	3.300	2.900	2.800	2.700	2.300	2.100	2.000	2.100	2.600
15 m	3.459	3.674	3.459	3.674	3.244	3.136	3.028	2.594	2.376	2.267	2.376	2.919
20 m	3.728	3.954	3.728	3.954	3.502	3.388	3.274	2.816	2.586	2.470	2.586	3.160
30 m	4.133	4.374	4.133	4.374	3.891	3.769	3.647	3.153	2.904	2.778	2.904	3.524
50 m	4.684	4.944	4.684	4.944	4.421	4.289	4.156	3.618	3.344	3.205	3.344	4.023

Extrapolation du paramètre c

Mois	Janv.	Fev.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
10 m	3.439	3.681	3.458	3.702	3.245	3.128	3.009	2.586	2.349	2.256	2.344	2.895
15 m	3.823	4.082	3.843	4.105	3.615	3.489	3.361	2.904	2.647	2.546	2.642	3.238
20 m	4.110	4.382	4.132	4.405	3.892	3.760	3.625	3.144	2.873	2.766	2.867	3.496
30 m	4.541	4.829	4.563	4.854	4.308	4.167	4.023	3.507	3.214	3.099	3.208	3.884
50 m	5.124	5.435	5.149	5.462	4.873	4.721	4.565	4.004	3.684	3.558	3.677	4.415

Extrapolation du paramètre k

Mois	Janv.	Fev.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
10 m	3.612	3.245	3.254	2.875	3.034	3.144	3.314	2.699	3.059	2.398	3.221	3.361
15 m	3.746	3.365	3.374	2.981	3.146	3.260	3.437	2.799	3.172	2.487	3.340	3.485
20 m	3.843	3.453	3.462	3.059	3.228	3.345	3.526	2.872	3.255	2.551	3.427	3.576
30 m	3.986	3.581	3.591	3.172	3.348	3.469	3.657	2.978	3.375	2.646	3.554	3.709
50 m	4.173	3.749	3.760	3.322	3.506	3.633	3.829	3.118	3.534	2.771	3.722	3.883

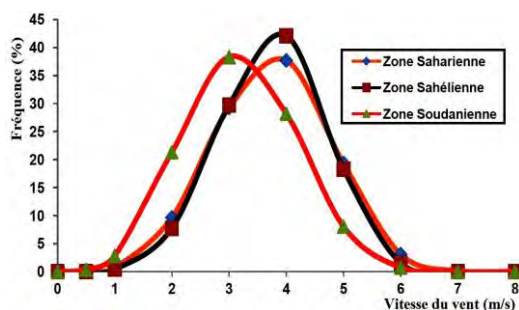


Fig. 1: Distribution de Fréquence de Weibull

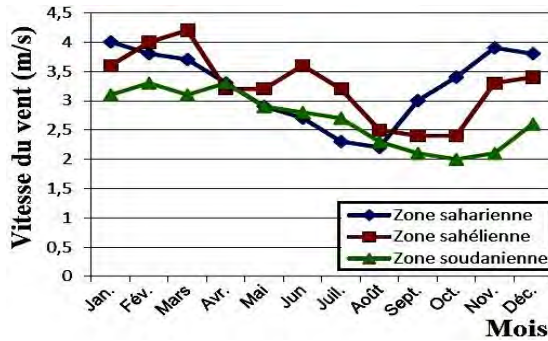


Fig. 2: Vitesse mensuelle de vent pour les trois zones climatiques

4. DISCUSSION

Les vitesses du vent mensuelles moyennes à 10 m d'altitude de trois sites ont été données dans le **Tableau 2**. La vitesse du vent a une valeur maximale de 4.2 m/s à N'Djaména dans la zone sahélienne(en Mars), alors que la vitesse du vent minimale de 2.0 m/s (Octobre) est enregistrée en Octobre à Moundou dans la zone Soudanienne.

La vitesse minimale moyenne annuelle du vent est obtenue à Moundou avec une valeur de 2.69 m/s, alors que, la vitesse maximale moyenne annuelle du vent est enregistrée à Faya-Largeau et N'Djaména avec une valeur de 3.25 m/s.

Ce même tableau récapitule les paramètres de Weibull, ainsi que les caractéristiques du vent en utilisant la distribution de Weibull. Les résultats pour la zone saharienne, zone sahélienne et zone soudanienne sont présentés respectivement dans le **Tableau 2, {2a, 2b et 2c}**.

On remarque que les zones les plus ventées sont les zones Saharienne et Sahélienne avec une vitesse moyenne du vent de l'ordre de 3.25 m/s, mais la zone Saharienne a une densité de puissance élevée de 28.602 W/m². Par contre, la zone soudanienne a une vitesse et une densité de puissance plus basses, dont les valeurs moyenne sont respectivement 2.69 m/s et 17.070 W/m².

Il peut être observé que le paramètre de forme varie entre 3.014 et 4.186 à Faya-Largeau (en Mars et Avril); 3.522 et 4.681 dans la zone sahélienne (en Octobre et Juin) et en zone soudanienne, ce facteur varie entre 2.398 et 3.612 (en Octobre et Janvier).

Le paramètre d'échelle varie entre 2.442 m/s et 4.426 m/s à Faya-Largeau (en Aout et Janvier); 2.644m/s et 4.603 m/s à N'Djaména (Septembre et Mars) et ce facteur varie enfin dans la zone soudanienne entre 2.256 m/s et 3.702 m/s (en Octobre et Avril), ce qui montre que la zone sahélienne est le site le plus venté. La valeur maximale de la densité de puissance moyenne mensuelle d'énergie éolienne de 52.433 W/m² est enregistrée dans la zone sahélienne (en Mars). Tandis que, la valeur minimale de la densité de puissance moyenne de 8.219 W/m² est enregistrée dans la zone Saharienne (en Août).

La valeur maximale de la densité de puissance moyenne annuelle de 28.602 W/m² est enregistrée dans la zone Saharienne, alors que la valeur minimale de 17.070 W/m² est enregistrée dans la zone soudanienne. Les valeurs de densité de puissance dans la

zone Sahélienne et dans la zone Saharienne sont encore importantes, ce qui signifie que l'implantation d'éolienne dans ces deux sites peut être efficace.

5. CONCLUSION

Les analyses thématiques des zones étudiées ont montré que les zones saharienne et sahélienne sont les zones les plus ventées du Tchad. Ainsi, on peut en conclure que ces zones restent les endroits les mieux appropriés pour implanter un système éolien rentable et performant.

Il en ressort que pour la zone sahélienne, la vitesse moyenne annuelle est de 3.25 m/s et les paramètres de Weibull ont une moyenne de 3.572 m/s pour le facteur d'échelle et 4.233 pour le facteur de forme et correspondant à une densité de puissance moyenne annuelle de 26.773 W/m².

Le mois de Mars est le mois le plus venté avec une vitesse moyenne du vent de 4.2 m/s.

Pour la zone saharienne, la vitesse du vent moyenne annuelle est de 3.25m/s, les paramètres de Weibull ont une moyenne de 3.598 m/s pour le facteur d'échelle et 3.746 pour le facteur de forme, correspondant à une densité moyenne annuelle de 28.602 W/m². Le mois le plus venté est le mois de janvier.

REFERENCES

- [1] G. Al Zohbi, P. Hendrick and P. Bouillard, '*Evaluation du Potentiel d'Energie Eolienne au Liban*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 17, N°1, pp. 83 – 96, 2014.
- [2] M. Elamouria and F. Ben Amar, '*Wind Energy Potential in Tunisia Energy Assessment of the First Wind Farm Section of Sidi Daoud, Tunisia*', Renewable Energy, Vol. 33, pp. 758 – 768, 2008.
- [3] Ben Amar, M. Elamouri and R. Dhifaoui, '*Energy Assessment of the First Wind Farm Section of Sidi Daoud, Tunisia*', Renewable Energy, Vol. 33, pp. 2311 – 2321, 2008.
- [4] M. Li and X. Li, '*On the Probabilistic Distribution of Wind Speeds: Theoretical Development and Comparison with Data*', International Journal of Exergy, Vol. 1, N°2, 2004.. Mikhail
- [5] A. Darwish and A. Sayigh, '*Wind Energy Potential in Iraq*', Solar Technology and Wind, Vol. 5, N°3, pp. 215 - 222, 1988.
- [6] C. Justus, W. Hargraves, A. Mikhail and D. Graber, '*Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions*', Journal of Applied Meteorology, Vol. 17, N°3, pp. 350 - 353, 1978.
- [7] D.K. Kaoga, N. Djongyang, S.Y. Doka and D. Raidandi, '*Assessment of Wind Energy Potential for Small Scale Water Pumping Systems in the North Region of Cameroon*', Asian Journal of Natural & Applied Sciences, Vol. 3, N°1, pp. 72 – 87,
- [8] M.R. Patel, '*Wind and Solar Power Systems*', U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York.

- [9] M.J. Stevens and P.T. Smulders, '*The Estimation of Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Utilization Purposes*', Wind Eng, Vol. 3, N°2, pp. 132 - 145, 1979.
- [10] B.W. Raichle and W.R. Carson, '*Wind Resource Assessment of the Southern Appalachian Ridges in the Southeastern United States*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, N°5, pp. 1104 - 1110, 2009.
- [11] Olayinka S Ohunakin¹, Olanrewaju M Oyewola and Muyiwa S Adaramola, '*Economic Analysis of Wind Energy Conversion Systems Using Levelized Cost of Electricity and Present Value Cost Methods in Nigeria*', International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2013
- [12] C. Justus and A. Mikhail, '*Height Variation of Wind Speed and Wind Distributions Statistics*', Geophysical Research Letters, Vol. 3, N°5, pp. 261 - 264, 1976.
- [13] Ajayi, O., Fagbenle, R., Katende. '*Wind Profile Characteristics and Econometrics Analysis of Wind Power Generation of a Site in Sokoto State, Nigeria*', Energy Science and Technology, Vol. 1, N° 2, pp. 54 – 66, 2011.
- [14] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, '*Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*', John Wiley and Sons Ltd. 2002.
- [15] P. Ramírez and J.A. Carta, '*Influence of the Data Sampling Interval in the Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Probability Density Distribution: A Case Study*', Energy Conversion and Management, Vol. 46, N°15, pp. 2419 - 2438, 2005.
- [16] K. Tar, '*Some Statistical Characteristics of Monthly Average Wind Speed at Various Heights*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, N°6, pp. 1712 - 1724, 2008.
- [17] F. Boukli Hacène, N. Kasbadji Merzouk et L. Loukarfi, '*Analyse Statistique et Elaboration d'un Atlas Eolien de La Vallée du Cheliff*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°4, pp. 583 – 588, 2007.
- [18] J.P. M'Batna, '*Energies Renouvelables: Quelles Perspectives pour le Tchad*', Forum Francophonie de l'Innovation, Namur fédération Wallonie-Bruxelles (2014).