

Evaluation du potentiel d'énergie éolienne au Liban

Ghida Al Zohbi ^{1*}, Patrick Hendrick ^{2†} et Philippe Bouillard ¹

¹ Building, Architecture and Town Planning, BATir, (CP 194/2)
Avenue F.D. Roosevelt 50, Bruxelles, 1050 Belgique

² Aéro Service-Thermo-Mécanique, (CP 165/41)
Avenue F.D. Roosevelt 50, Bruxelles, 1050 Belgique

(reçu le 20 Octobre 2013 – accepté le 31 Mars 2014)

Résumé - Dans cette étude, les caractéristiques du vent sont analysées en utilisant les données de la vitesse du vent recueillies pour cinq stations météorologiques au Liban et disponibles pour au moins une année (2 ans pour Klaiaat, 10 ans pour les Cèdres, 7 ans pour Daher El Baydar, 2 ans pour Quaraoun et 1 an pour Marjoun). La distribution de Weibull est utilisée pour modéliser la vitesse du vent à ces 5 endroits du Liban. Les paramètres de forme et d'échelle ont été estimés en utilisant quatre méthodes, la méthode de variabilité, la méthode d'écart-type, la méthode de densité de puissance et la méthode marocaine. Le but de cet article est de comparer les méthodes d'évaluation du potentiel éolien, ainsi que l'évaluation de la densité de puissance aux différentes altitudes. Il a été observé que les estimations en utilisant la méthode de densité de puissance ont donné le meilleur ajustement global de la distribution des données du vent. Les paramètres de forme et d'échelle varient considérablement au cours d'un mois. La variation annuelle de la densité de puissance varie entre 2397 W/m² et 784 W/m² à Daher El Baydar et aux Cèdres pour la valeur maximale et minimale. L'extrapolation de la vitesse du vent et des paramètres de Weibull augmente avec l'altitude et par conséquent, la densité de puissance aussi.

Abstract – In this study, wind characteristics are analyzed using data collected wind speed for five weather stations in Lebanon and available for at least one year (2 years for Klaiaat 10 years for Cedars, 7 years for Daher El Baydar, 2 years for Quaraoun and 1 year for Marjoun). The Weibull distribution is used to model the wind speed at these five locations in Lebanon. Shape parameters and scale were estimated using four methods, the variability of the method, the method of standard deviation, the method of power density and the moroccan method. The purpose of this article is to compare the methods of assessment of wind energy potential, as well as evaluation of the power density at different altitudes. It was observed that the estimates using the method of power density gave the best overall fit of the data distribution of the wind. Shape parameters and scale vary considerably over a month. The annual variation of the power density varies between 2397 W/m² and 784 W/m² at Daher El Baydar and at Cedars for the maximum and minimum value. The extrapolation of the wind speed and the Weibull parameters increases with altitude and thus the power density increases.

Mots clés: Paramètres de Weibull - Méthode de variabilité - Méthode de densité de puissance - Méthode marocaine - Méthode d'écart type – RMSE - R² - Extrapolation.

* galzohbi@ulb.ac.be , philippe.bouillard@ulb.ac.be

† patrick.hendrick@ulb.ac.be

1. INTRODUCTION

L'énergie éolienne est au cœur de l'actualité. Elle est de nos jours la source d'énergie qui se développe le plus rapidement à l'échelle mondiale. Grâce à l'amélioration décisive des technologies au cours de ces 30 dernières années, la production d'électricité par énergie éolienne a atteint un haut niveau de maturité technologique et de fiabilité industrielle (De Herde *et al.*, 2006).

Au Liban, l'énergie électrique est assurée par la production des centrales thermiques et hydrauliques et par l'importation venant d'Égypte et de Syrie. La production se fait principalement en utilisant des combustibles fossiles (Bassil, 2010). La demande dépasse toujours l'offre et les pannes sont fréquentes dans les périodes de pointe (Tannous *et al.*, 2010). La demande d'électricité est également en constante (Fig. 1). En 2009, lors du sommet de Copenhague, le Liban s'était engagé, à produire 12 % de son énergie à partir de sources renouvelables, à l'horizon de 2020 (Hamdan, 2011). Il est donc urgent pour le Liban de trouver une solution pour couvrir la demande avec une source d'énergie propre.

Une des pistes que nous souhaitons examiner dans cette étude est l'implantation de sites de production d'énergie éolienne. Pour la production d'électricité, il s'agit d'une source d'énergie propre, sans combustible et renouvelable.

Dans cette étude, on détermine la méthode la plus précise pour calculer les paramètres de forme et d'échelle. On estime la densité de puissance pour cinq sites, ainsi que la densité de puissance pour différentes hauteurs du mât de l'éolienne.

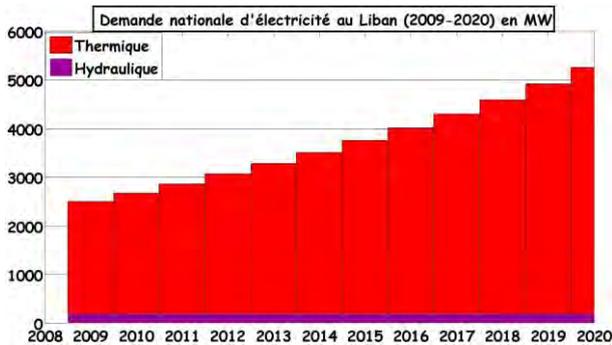


Fig. 1 Evolution de la demande d'électricité au Liban (Bassil, 2010)

2. DONNEES DE VENT

Les données de cette étude viennent du service météorologique au Liban. Les mesures de la vitesse du vent sont faites à 10 m de hauteur. Le système utilisé pour la mesure de la vitesse du vent est 'Auria E' qui est un système d'acquisition de données, couramment utilisé par Météo France (Hassan, 2011). Cet enregistreur est généralement utilisé en combinaison avec un anémomètre et une girouette.

Les coordonnées géographiques des sites sont données au **Tableau 1**.

Le **Tableau 2** donne la distribution mesurée à long terme de la vitesse du vent pour ces cinq stations.

La vitesse du vent moyenne mensuelle pour chaque site est représentée à la figure 2.

Tableau 1: Coordonnées géographiques des sites sélectionnés[‡] (Hassan, 2011)

Station	Abscisse	Ordonnée	Altitude	Données fournies
Daher el Baydar	706366 m	3682611 m	1524 m	Nov.1999-Jan.2010
Klaiaat Akkar	78097 m	3793722 m	5 m	Jan.2008-Jan.2010
Les Cèdres	774278 m	3823977 m	1916 m	Jan.1999-Jui.2008
Marjyoun	749026 m	3715206 m	760 m	Mar.2009-Feb.2010
Quaraoun	738724 m	3714557 m	855 m	Sept.2007-Jan.2010

Tableau 2: Distribution mesurée de la vitesse du vent[§]

Vitesse	Klaiaat	Marjyoun	Les cèdres	Quaraoun	D.ElBaydar
0 (m/s)	0.0134	0.000	0.002	0.003	0.000
1	0.109	0.033	0.035	0.062	0.021
2	0.344	0.155	0.212	0.228	0.089
3	0.492	0.324	0.527	0.422	0.191
4	0.614	0.485	0.766	0.624	0.325
5	0.719	0.623	0.866	0.791	0.484
6	0.794	0.749	0.918	0.906	0.639
7	0.853	0.842	0.953	0.967	0.767
8	0.894	0.919	0.971	0.987	0.855
9	0.922	0.967	0.984	0.995	0.908
10	0.943	0.988	0.991	0.998	0.940
11	0.962	0.997	0.995	0.999	0.962
12	0.980	0.999	0.997	1.000	0.976
13	0.992	1.000	0.999		0.983
14	0.996		1.000		1.000
15	0.998				
16	0.999				
17	0.999				
18	1.000				

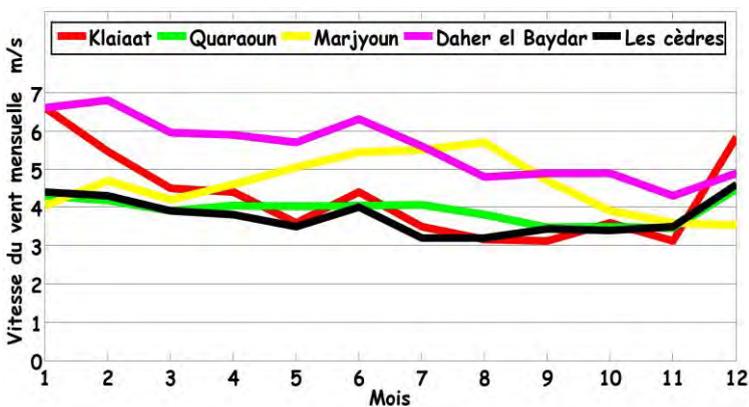


Fig. 2: Vitesse de vent mensuelle pour les cinq sites (Hassan, 2011)

[‡] Système de coordonnées est la Zone UTM 36S, Référence WGS84.

[§] Ces données ont été fournies par Dr. Riad Al Khodari, Chef du Service Météorologique du Liban, 14/09/2012

3. METHODOLOGIE

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, puisqu'elle donne un bon accord avec les données expérimentales selon Darwish (Darwish *et al.*, 1988). La fonction de densité de probabilité de Weibull est donnée par (Justus *et al.*, 1978) avec:

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

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. L'une des propriétés importantes de la distribution de Weibull qui la rend si utile pour les applications éoliennes est qu'une fois ces paramètres estimés à une hauteur, il est possible de les ajuster à différentes hauteurs.

Une revue de la littérature pour cette étude montre que, pour la plupart des conditions du vent dans le monde, le facteur de forme k varie entre 1.2 et 2.75 (Justus *et al.*, 1978). La fonction de répartition est donnée par (Justus *et al.*, 1978) :

$$F(v) = \int_{-\infty}^v f(t) \times dt = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

Il existe plusieurs méthodes pour estimer les paramètres de Weibull. On va ici discuter quatre méthodes couramment utilisées. L'une d'entre elles, qui est la plus précise, va être utilisée dans cette étude.

3.1 Méthode de variabilité du vent (Justus *et al.*, 1978)

Cette approche empirique, consiste à estimer k , à partir de la variabilité du vent et de la vitesse moyenne du vent.

$$k = 1.05 \times v^{0.5} \quad \text{pour une faible variabilité du vent} \quad (3)$$

$$k = 0.94 \times v^{0.5} \quad \text{pour une faible variabilité du vent} \quad (4)$$

$$k = 0.83 \times v^{0.5} \quad \text{pour une faible variabilité du vent} \quad (5)$$

Le calcul de ' c ' est fait à partir de la formule suivante:

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (6)$$

$$\text{où } \Gamma \text{ est la fonction gamma définie par } \Gamma(v) = \int_0^{+\infty} t^{v-1} e^{-t} dt \quad (7)$$

3.2 Méthode de l'écart-type (Justus *et al.*, 1978)

Cette méthode est suggérée par Justus *et al.*. Si la vitesse moyenne et l'écart-type sont disponibles, l'estimation des paramètres se fait en utilisant les deux formules suivantes:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1.086} \quad (8)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)}$$

3.3 Méthode de la densité de puissance (Raichle *et al.*, 2009)

L'expression de la densité de puissance pour la distribution de Weibull est donnée par:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \times \int_0^3 v^3 f(v) dv \quad (9)$$

où ρ est la masse volumique de l'air (kg/m^3)

$$\text{La vitesse moyenne cubique est } \bar{v}^3 = c^3 \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (10)$$

$$\text{La vitesse cubique moyenne est } v^3 = c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (11)$$

$$\text{On définit le facteur de modèle d'énergie } E_{pf} = \frac{v^3}{\bar{v}^2} \quad (12)$$

La valeur de k est déterminée en utilisant E_{pf}

$$k = 1 + \frac{3.69}{E_{pf}^2} \quad (13)$$

$$\text{Et par suite } c = \frac{\bar{v}}{\Gamma (1 + 1/k)} .$$

3.4 Méthode marocaine (Mabchour, 1999)

Cette méthode a été utilisée lors de l'évaluation du potentiel éolien au Maroc. On détermine k par la formule suivante:

$$k = 1 + (0.483 \times (\bar{v} - 2))^{0.51} \quad (14)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma (1 + 1/k)}$$

Dans le but de tester les différentes méthodes, on va calculer les paramètres d'analyse statistique suivants (Akpınar *et al.*, 2007; Ben Amar *et al.*, 2008):

Le coefficient de détermination R -

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (15)$$

et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne-

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right)^{0.5} \quad (16)$$

Où N est le nombre total d'intervalles, y_i est la fréquence de valeur observée, x_i est la fréquence de valeur obtenue par la distribution de Weibull et \bar{y} la valeur moyenne de y_i .

Un modèle est dit idéal, s'il est caractérisé par une valeur nulle pour RMSE et 1 pour le paramètre R^2 .

3.5 Extrapolation de la vitesse du vent et des paramètres de Weibull

En général, 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 (Justus *et al.*, 1976):

$$v = v_0 \times (z / z_0)^\alpha \quad (17)$$

$$\alpha = 1 / \ln(z_g / r_0) \quad (18)$$

Avec v_0 , la vitesse du vent mesurée à 10 m d'altitude, v , la vitesse qui doit être calculée à l'altitude z , α , l'exposant de loi de puissance qui est en fonction de la rugosité de surface, z_g , la moyenne géométrique de la hauteur $(z_0 * z)^{0.5}$ et r_0 , la rugosité du sol.

L'extrapolation des paramètres de Weibull est obtenue par les relations suivantes (Justus *et al.*, 1976):

$$k_z = \frac{k_a}{1 - 0.00881 \times \ln(z / 10)} \quad (19)$$

$$C_z = C_0 \times (z / z_0)^n \quad (20)$$

$$n = \frac{0.37 - 0.088 \ln C_0}{1 - 0.00881 \times \ln(z / 10)} \quad (21)$$

3.6 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 (Ramirez *et al.*, 2005; Tar, 2008):

$$P(v) = \frac{\rho \times v^2}{2} \times v \times A \quad [W] \quad (22)$$

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 (Ramirez *et al.*, 2005; Tar, 2008).

Dans cette étude, on utilise la masse volumique de l'air moyenne $\bar{\rho}$ 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:

$$\frac{P(v)}{A} f(v, k, c) = \frac{1}{2} \times \bar{\rho} \times v^3 \times f(v, k, c) \quad [W/m^3s] \quad (23)$$

En intégrant l'équation (23) pour une période d'étude, on obtient la densité de puissance du vent moyenne:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \bar{\rho} \times \int_0^{\infty} v^3 f(v, k, c) \times dv = \frac{1}{2} \times \bar{\rho} \times c^3 \times \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (24)$$

4. RESULTATS ET DISCUSSION

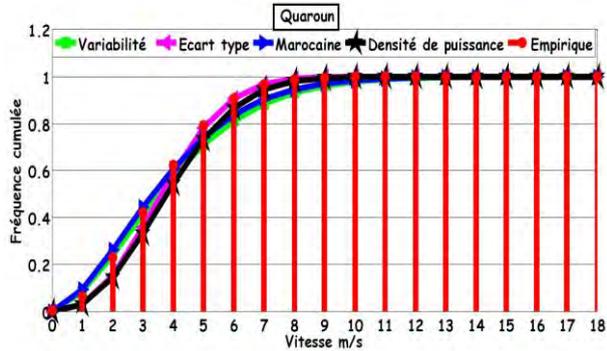
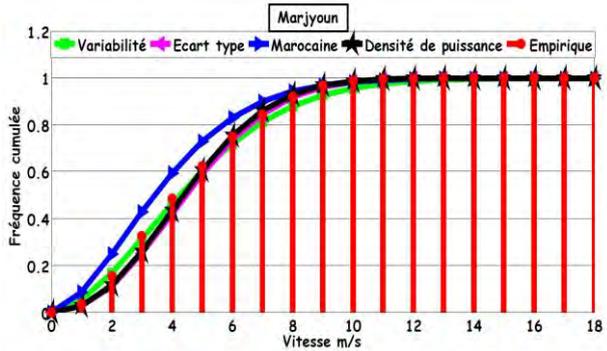
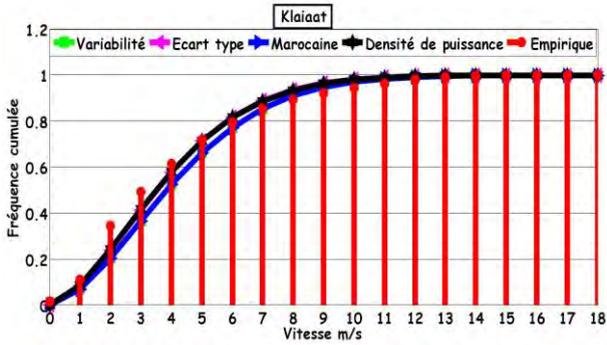
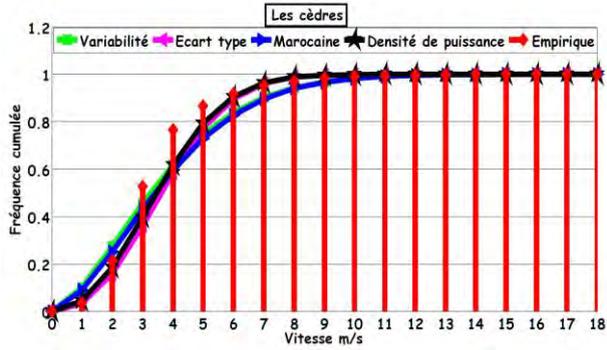
Les vitesses du vent mensuelles moyennes à 10 m d'altitude de cinq sites ont été représentées à la figure 2. La vitesse du vent a une valeur maximale de 6.8 m/s à Daher El Baydar (en Février), alors que la vitesse du vent minimale de 3 m/s est enregistrée en Septembre à Klaiaat.

La vitesse minimale moyenne annuelle du vent est obtenue à Quaraoun et aux Cèdres avec une valeur de 3.9 m/s, alors que, la vitesse maximale moyenne annuelle du vent est enregistrée à Daher El Baydar avec une valeur de 5.4 m/s.

Le **Tableau 3** représente les paramètres de forme et d'échelle pour les cinq sites, tels qu'estimés en utilisant la méthode de variabilité, la méthode d'écart-type, la méthode marocaine et la méthode de densité de puissance.

Les courbes qui représentent les fréquences cumulées mesurées et les fréquences cumulées de Weibull estimées sont données à la figure 3. Pour chaque site, il n'y a pas une grande différence entre les paramètres estimés par les quatre méthodes.

Les paramètres estimés par la méthode marocaine et la méthode de variabilité sont très proches, tandis que les paramètres estimés par la méthode de densité de puissance sont très proches de la méthode de l'écart-type. Pour tous les sites, les courbes données par la méthode de densité de puissance ont été les plus proches des distributions mesurées.



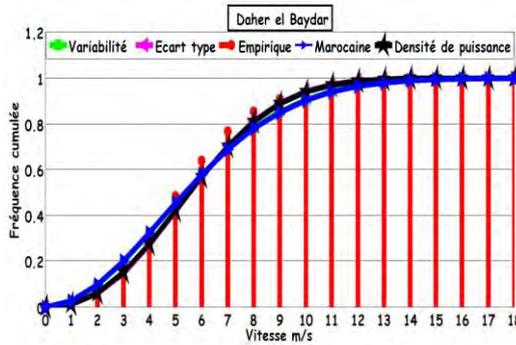


Fig. 3: Comparaison de la fréquence cumulée calculée par les quatre (4) méthodes pour les cinq (5) sites

Les résultats des indicateurs statistiques de précision, RMSE et R^2 sont donnés au **Tableau 4** pour les cinq sites et pour les quatre méthodes utilisées. La comparaison des quatre méthodes utilisées avec les valeurs mesurées montre que la méthode de densité de puissance donne la meilleure estimation de la distribution mesurée pour tous les sites à l'exception de Quaraoun.

Les valeurs de RMSE de la méthode de densité de puissance pour tous les sites sont les plus proches de zéro et les valeurs de R^2 pour cette méthode sont les plus proches de 1 pour tous les sites à l'exception de Quaraoun. La méthode de l'écart-type donne la meilleure estimation pour Quaraoun.

La variation mensuelle des paramètres de forme et d'échelle de Weibull, qui sont estimés par les quatre méthodes utilisées, est représentée au **Tableau 5** pour les cinq sites étudiés.

Il peut être observé que le paramètre de forme k varie entre 1.4 à Klaiaat (en Mars et Avril) et 3.04 aux Cèdres (en Octobre). Donc, la vitesse du vent est plus uniforme aux Cèdres pendant le mois d'octobre, alors qu'elle est moins uniforme à Klaiaat pendant le mois de Mars et d'Avril.

Le paramètre d'échelle c varie entre 3.44 m/s à Klaiaat (en Septembre) et 7.66 m/s à Daher El Baydar (en Février), ce qui montre que Daher El Baydar est le site le plus venteux.

La valeur maximale de la densité de puissance moyenne mensuelle d'énergie éolienne de 405.4 W/m² est enregistrée à Daher El Baydar (en Janvier) (**Tableau 6**). Tandis que, la valeur minimale de la densité de puissance moyenne de 32.8 W/m² est enregistrée aux Cèdres (en Juillet) (**Tableau 6**).

La valeur maximale de la densité de puissance moyenne annuelle de 199,8 W/m² est enregistrée à Daher El Baydar, alors que la valeur minimale de 65,35 W/m² est enregistrée aux Cèdres (**Tableau 6**). La densité de puissance annuelle estimée à Klaiaat est 136,9 W/m² et celle à Marjyoun est 109 W/m².

Les valeurs de densité de puissance à Klaiaat et aux Cèdres sont encore importantes, ce qui signifie que l'implantation d'éolienne dans ces deux sites peut être efficace.

Aux figures 4 et 5, on présente les résultats obtenus à partir des caractéristiques du vent extrapolées. La vitesse du vent et la densité de puissance augmentent avec l'altitude, on remarque qu'à 50 m d'altitude la vitesse du vent minimale moyenne

annuelle de 6 m/s et la densité de puissance minimale moyenne annuelle de 149 W/m², sont enregistrées aux Cèdres, alors que la vitesse maximale moyenne annuelle de 8 m/s et la densité de puissance maximale moyenne annuelle de 456 W/m², sont enregistrées à Daher El Baydar.

A 100 m d'altitude, la vitesse du vent minimale moyenne annuelle de 6.9 m/s, et la densité de puissance minimale moyenne annuelle de 239.7 W/m², extrapolées sont enregistrée aux Cèdres, alors que la vitesse maximale moyenne annuelle extrapolée de 9.4 m/s et la densité de puissance maximale moyenne annuelle de 661.23 W/m² sont enregistrée à Daher El Baydar.

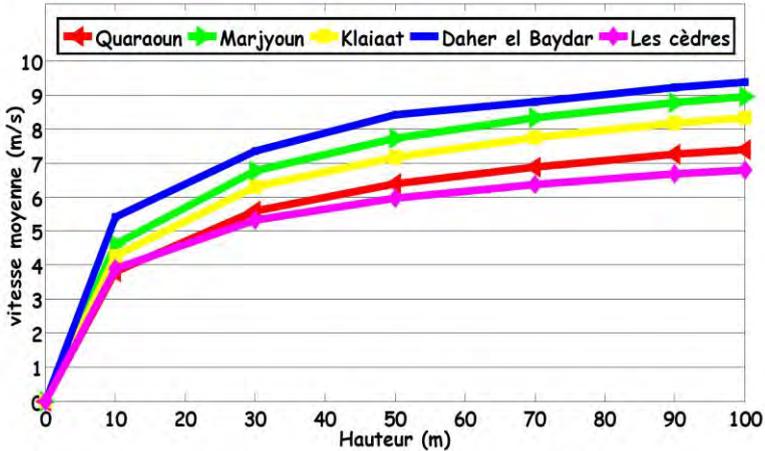


Fig. 4: Vitesse moyenne du vent pour différentes altitudes

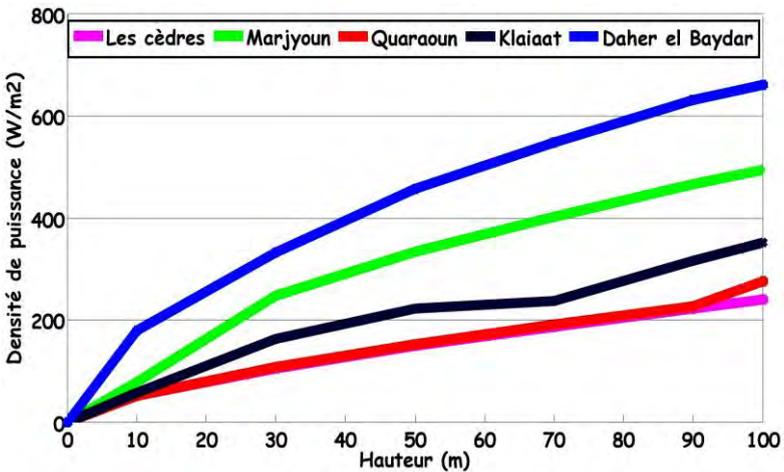


Fig. 5: Evaluation de la densité de puissance pour différentes altitudes

A partir de 50 m d'altitude, tous les sites ont une vitesse du vent plus élevée que 6 m/s, ce qui est bien suffisant pour la production d'électricité avec des éoliennes.

Tableau 3: Paramètres de forme et d'échelle annuelle pour les cinq sites en utilisant les quatre méthodes

Méthode	Klaiaat		Marjyoun		Les Cèdres		Quaraoun		DaherElBaydar	
	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)
Variabilité	1.7	4.77	1.77	5.23	1.58	4.11	1.65	4.4	1.95	6.25
Ecart type	1.68	4.37	2.20	5.27	2.35	4.32	2.42	4.2	2.438	5.493
Densité de puissance	1.65	4.36	2.23	5.16	2.22	4.07	2.33	4.44	2.36	6.30
Marocaine	1.75	4.78	1.67	4.42	1.64	4.25	1.63	4.16	1.805	5.347

Tableau 4: Comparaison des méthodes pour les cinq sites étudiés

Sites		Méthode de variabilité	Méthode d'écart-type	Méthode marocaine	Méthode de densité de puissance
Klaiaat	RMSE	0.0521	0.0389	0.0367	0.0367
	R ²	0.970	0.9836	0.9855	0.9855
Marjyoun	RMSE	0.0204	0.0263	0.0431	0.0225
	R ²	0.9966	0.9944	0.9849	0.9959
Les cèdres	RMSE	0.0590	0.0694	0.0643	0.0496
	R ²	0.9693	0.9574	0.9635	0.9782
Quaraoun	RMSE	0.0400	0.0254	0.0295	0.0386
	R ²	0.9559	0.9574	0.9923	0.9868
Daher el Baydar	RMSE	0.0332	0.0345	0.0359	0.0332
	R ²	0.9919	0.9912	0.9905	0.9919

Tableau 5: Estimation du facteur de forme et d'échelle mensuelle pour les quatre méthodes utilisées

Mois	Les cèdres		Marjyoun		Quaraoun		Kaiaat		D.ElBaydar	
	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)
Méthode de l'écart type										
Janvier	2.14	4.96	2.25	4.57	2.71	4.85	1.85	7.43	1.85	7.44
Février	1.98	4.81	1.93	5.29	2.27	4.72	1.66	6.10	1.99	7.66
Mars	1.95	4.35	2.18	4.69	2.25	4.41	1.41	4.91	2.14	6.73
Avril	2.12	4.34	2.53	5.19	2.60	4.55	1.42	4.80	2.28	6.64
Mai	2.51	4.00	2.31	5.70	2.36	4.54	1.66	4.02	2.73	6.40
Juin	2.42	4.52	2.33	6.14	2.39	4.56	1.67	4.88	2.64	7.06
Juillet	2.69	3.6	2.41	6.19	2.62	4.57	1.89	3.92	3.20	6.26
Août	2.72	3.56	2.78	6.43	2.31	4.24	1.91	3.55	2.53	5.36
Sept.	2.88	3.86	2.26	5.36	2.30	3.92	1.81	3.50	2.48	5.49
Oct.	3.04	3.81	2.01	4.42	2.40	3.95	1.60	4.01	2.31	5.56
Nov.	2.00	3.93	2.21	4.05	2.69	3.88	1.77	3.50	3.39	5.56
Déc.	1.72	5.16	1.74	3.96	1.84	5.05	1.54	6.49	2.48	5.49

Mois	Les cèdres		Marjyoun		Quaraoun		Kaiaat		D.ElBaydar	
	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)	k	c (m/s)
Méthode marocaine										
Jan.	1.75	4.94	1.70	4.54	1.74	4.82	2.05	7.45	2.05	7.46
Fev.	1.73	4.79	1.80	5.27	1.72	4.69	1.916	6.15	2.07	7.66
Mars	1.66	4.32	1.71	4.66	1.67	4.37	1.77	5.02	1.97	6.72
Avril	1.66	4.3	1.78	5.17	1.69	4.53	1.75	4.90	1.96	6.63
Mai	1.60	3.96	1.85	5.69	1.69	4.51	1.61	4.01	1.94	6.42
Juin	1.69	4.49	1.90	6.13	1.70	4.54	1.75	4.9	1.01	7.08
Juillet	1.53	3.55	1.91	6.19	1.69	4.55	1.59	3.88	1.93	6.32
Août	1.52	3.52	1.94	6.45	1.64	4.21	1.52	3.49	1.81	5.35
Sept.	1.58	3.84	1.80	5.33	1.59	3.87	1.51	3.45	1.82	5.48
Oct.	1.57	3.79	1.67	4.38	1.59	3.90	1.61	4.01	1.83	5.54
Nov.	1.59	3.88	1.61	4.00	1.58	3.85	1.51	3.45	1.74	4.83
Déc.	1.78	5.16	1.60	3.99	1.77	5.03	1.95	6.59	1.83	5.54
Méthode de densité de puissance										
Jan.	2.00	4.96	2.15	4.57	2.11	4.84	1.87	7.44	1.73	7.42
Fev.	1.87	4.80	1.89	5.24	2.25	4.72	1.67	6.11	1.97	7.65
Mars	1.81	4.34	2.15	4.69	2.27	4.41	1.40	4.90	2.06	6.72
Avril	1.96	4.33	2.48	5.19	2.54	4.59	1.40	4.79	2.24	6.64
Mai	2.35	4.00	2.29	5.70	2.34	4.54	1.63	4.02	2.64	6.41
Juin	2.33	4.52	2.34	6.14	2.38	4.57	1.66	4.88	2.59	7.07
Juillet	2.45	3.61	2.45	6.19	2.61	4.60	1.90	3.92	3.00	6.28
Août	2.04	3.58	2.75	6.44	2.33	4.25	1.90	3.55	2.52	5.36
Sept.	2.69	3.87	2.29	5.35	2.29	3.92	1.82	3.51	2.47	5.49
Oct.	2.82	3.83	2.06	4.42	2.36	3.95	1.54	4.00	2.35	5.56
Nov.	1.89	3.93	2.30	4.05	2.64	3.88	1.71	3.50	2.35	5.56
Déc.	1.66	5.14	1.68	3.95	1.83	5.04	1.54	6.44	2.47	5.49
Méthode de Variabilité										
Jan.	1.74	4.94	1.67	4.53	1.78	4.82	2.13	7.45	2.13	7.46
Fev.	1.71	4.79	1.80	5.27	1.70	4.67	1.94	6.15	2.16	7.66
Mars	1.63	4.31	1.69	4.66	1.64	4.36	1.75	5.02	2.02	6.72
Avril	1.63	4.29	1.78	5.17	1.67	4.53	1.73	4.90	2.01	6.64
Mai	1.56	3.95	1.86	5.69	1.66	4.50	1.57	4.01	1.98	6.43
Juin	1.66	4.48	1.94	6.14	1.67	4.53	1.73	4.89	2.07	7.09
Juillet	1.48	3.54	1.94	6.19	1.67	4.55	1.55	3.87	1.96	6.33
Août	1.48	3.91	1.99	6.46	1.61	4.20	1.47	3.48	1.81	5.35
Sept.	1.54	3.83	1.88	5.54	1.55	3.86	1.46	3.44	1.83	5.48
Octobre	1.53	3.78	1.64	4.38	1.55	3.90	1.57	4.00	1.84	5.54
Novembre	1.55	3.87	1.57	4.99	1.54	3.84	1.46	3.44	1.75	4.82
Décembre	1.78	5.16	1.56	3.93	1.75	5.03	2.00	6.59	1.84	5.52

Tableau 6: Densité de puissance (W/m^2)
estimée pour les cinq sites libanais retenus

Mois	Les cèdres $\rho=1.25kg/m^3$	Marjoun $\rho=1.22 kg/m^3$	Quaraoun $\rho=1.23kg/m^3$	Klaiaat $\rho=1.21kg/m^3$	D. el baydar $\rho=1.25kg/m^3$	Total (W/m^2)
Jan.	101,3790	72,1007	105,1542	357,3419	405,3525	1041,3283
Fev.	99,1319	124,2847	101,9656	230,6532	378,0243	934,0596
Mars	76,3206	77,9308	87,6011	163,0609	244,6113	649,5247
Avr.	68,9343	94,4613	95,5543	152,8625	218,6513	630,4637
Mai	46,0240	132,6015	94,5258	68,1959	175,3911	519,7383
Juin	66,8408	162,9873	95,5543	118,5913	238,0103	681,9839
Juil.	32,8380	161,5761	96,8255	51,2862	154,7957	497,3215
Août	37,3485	169,7514	80,6348	38,0914	105,4932	431,3194
Sept.	38,1924	109,6441	66,7081	38,8066	114,8563	368,2075
Oct.	36,1214	67,9337	68,8035	73,8545	123,6029	370,3161
Nov.	37,9471	47,4013	40,7362	41,8713	123,6029	291,5606
Déc.	143,1552	62,2786	122,2845	308,2157	114,8563	750,7903
Annuel	784,2332	1282,9534	1056,3479	1642,8313	2397,2482	-

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A partir des données statistiques disponibles et des calculs réalisés, on peut tirer les conclusions suivantes:

- La méthode de densité de puissance donne la meilleure estimation de la distribution mesurée pour tous les sites, à l'exception de Quaraoun, la méthode d'écart-type donne la meilleure estimation.
- La valeur de vitesse du vent moyenne mensuelle maximale de 6.8 m/s est enregistrée à Daher El Baydar (en Février) et la valeur minimale de 3.1 m/s est enregistrée à Klaiaat (en Septembre), tandis que la vitesse du vent moyenne annuelle minimale de 3.9 m/s est obtenue aux Cèdres, et la valeur maximale de 5.4 m/s est obtenue à Daher El Baydar.
- L'estimation des paramètres de Weibull (k et c) pour tous les sites, montre que le vent est suffisant durant les premiers mois de l'année pour une importante production d'énergie.
- L'estimation de la densité de puissance pour tous les sites, montre que les valeurs de densité de puissance les plus importantes sont enregistrées durant les premiers mois de l'année. Ceci est en accord avec les résultats obtenus à partir de l'estimation des paramètres de Weibull.
- Daher El Baydar et Klaiaat sont les meilleurs sites pour exploiter la puissance du vent au Liban et produire une énergie électrique significative.

Les résultats obtenus permettent de dégager d'excellentes recommandations pour des projets d'implantation d'éoliennes au Liban.

Remerciements- Le premier auteur remercie le fond Xénophilia de l'ULB pour son aide au financement de ce projet doctoral.

REFERENCES

- [1] S. Akpinar and E.K Akpinar, 'Wind Energy Analysis Based on Maximum Entropy Principle (MEP)-Type Distribution Function', Energy Conversion and Management, Vol. 48, N°4, pp. 1140 - 1149, 2007.

- [2] G. Bassil, '*Plan Stratégique National pour le Secteur d'Electricité, Beyrouth-Liban*', Ministère de l'Energie et de l'Eau: 39., 2010.
- [3] F. Ben Amar, M. Elamouri and R. Dhifaoui, '*Energy Assessment of the First Wind Farm Section of Sidi Daoud, Tunisia*', *Renewable Energy*, Vol. 33, N°10, pp. 2311 - 2321, 2008.
- [4] A. Darwish and A. Sayigh, '*Wind Energy Potential in Iraq*', *Solar Technology and Wind*, Vol. 5, N°3, pp. 215 - 222, 1988.
- [5] A. de Herde, P. Gerin, J.F. Ledent et H. Jeanmart, '*Energie Eolienne: Quelle Energie Hybride pour Combler ses Défauts?*', 16p, 2006. Disponible sur-
<http://www.apere.org/manager/docnum/doc/doc1220_Eol_hybride_UCL-meca_061206.fiche%202.pdf>
- [6] S. Hamdan, '*12 % d'Énergie Renouvelable en 2020: peut-on aller plus loin ?*', [en ligne] (page consultée le 29/09/2011),. Disponible sur-
<<http://mplbelgique.wordpress.com/2011/09/29/12-d%E2%80%99energie-renouvelable-en-2020-peut-on-aller-plus-loin>>
- [7] G. Hassan, '*The National Wind Atlas of Lebanon. Beyrouth-Lebanon*', UNDP, CEDRO: 64, 2011.
- [8] C. Justus, W. Hargraves, et al., '*Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions*', *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 17, N°3, pp. 350 - 353, 1978.
- [9] 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.
- [10] H. Mabchour, '*Etude Modélisation et Expérimentation des Composants d'un Système Hybride Couplant les Énergies Solaire et Éolienne: Performances et Méthodologie de Dimensionnement*', Thèse de Doctorat: Énergétique. Casablanca, Université Hassan II, Mohammedia, 143 p., 1999.
- [11] 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.
- [12] P. Ramirez 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.
- [13] N. Tannous, H.B. Habib, et al., '*Crise de l'Énergie*', *Rapport Technique*, 16 p., 2010.
- [14] 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.