

# Modélisation et simulation numérique des données du vent en vue d'une prédiction de l'énergie électrique d'origine éolienne: cas d'un site de la ville de Ngaoundéré au Cameroun

M. Kazet <sup>1</sup>, R. Mouangue <sup>2</sup>, A. Kuitche <sup>1</sup>, J.M. Ndjaka <sup>3</sup> et S. Takam <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Département de GEEA, ENSAI, PAI, Université de Ngaoundéré, Cameroun

<sup>2</sup> Département de Génie Energétique, IUT, Université de Ngaoundéré  
B.P. 457 Ngaoundéré Cameroun

<sup>3</sup> Département de Physique, Faculté des Sciences,  
Université de Yaoundé I, Cameroun

<sup>4</sup> Agence pour la Sécurité de la Navigation  
Aérienne en Afrique et à Madagascar, Ngaoundéré, Cameroun

(reçu le 28 Juillet 2013 – 29 Septembre 2013)

**Résumé** - Ce travail de recherche a pour but de présenter une étude permettant d'apporter une aide efficace à la prise des décisions concernant la planification et la réalisation de projets à énergie éolienne. Dans cette perspective, nous commençons par la détermination des différents paramètres liés au vent, telle que la modélisation mathématique de la distribution des fréquences du vent: distribution de Weibull, puis le traitement et la simulation numérique des données réelles relatives au vent collectées pendant douze mois, afin de fournir des prédictions sur un site de la ville de Ngaoundéré. Ensuite, nous évaluons son potentiel éolien, sa prédiction de l'énergie électrique produite tout en nous appuyant sur la prise en compte des obstacles environnant le site de la collecte, de la rugosité du site et d'un choix judicieux d'aérogénérateurs. Enfin, nous déterminons la direction des éoliennes dans le site et nous procédons à une analyse de la turbulence du vent.

**Abstract** - Our research aims to present a study to provide effective aid to decision making concerning the planning and implementation of wind energy projects. In this perspective, we begin by determining the various parameters related to wind, such as mathematical modeling of the frequency distribution of wind: Weibull distribution, then processing and numerical simulation of actual wind data collected for twelve months in order to provide predictions on a site of the town of Ngaoundere. Then, we evaluate the wind potential, his prediction of the electrical energy produced while relying on the consideration of the barriers surrounding the site of collect, the roughness of the site and a choice of wind turbines. Finally, we determine the direction of the wind turbines on the site and we conduct an analysis of wind turbulence.

**Mots clés:** Eolienne – Conversion d'énergie – Modélisation – Simulation numérique – Ngaoundéré.

## 1. INTRODUCTION

De nos jours, la part des énergies renouvelables ne représente qu'environ 20,2 % de la production mondiale d'électricité [1]. Bien qu'énergie finale propre par excellence, il apparaît donc de manière évidente que la production d'électricité contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ressources non renouvelables (combustibles fossiles). L'énergie éolienne, qui depuis 2009 est la seconde source d'énergie renouvelable, reste encore inexploitée au Cameroun malgré son potentiel a priori considérable en Afrique [1, 2].

Pour préparer un développement réellement durable, l'une des mesures pourrait être d'accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité. C'est pourquoi une phase d'étude au préalable se révèle d'un extrême intérêt dans la mesure où on pourra estimer le potentiel éolien, l'énergie électrique fournie, les conditions et les contraintes à prendre en compte dans la réalisation d'un projet éolien.

L'objectif général de cet article est de contribuer au développement de l'exploitation des ressources énergétiques nationales pour l'approvisionnement en électricité tout en profitant des potentialités à priori importantes qu'offre le gisement éolien du Cameroun.

## 2. MODELISATION MATHEMATIQUE

### 2.1 Modélisation de la distribution des fréquences du vent

#### 2.1.1 Distribution de Weibull

La distribution de Weibull est un cas particulier de la distribution de Pierson de type III [3]. Dans cette distribution, les variations de la vitesse du vent sont caractérisées par deux fonctions : la fonction densité de probabilité et la fonction de répartition.

La fonction densité de probabilité  $f(v)$  indique la fraction de temps (ou la probabilité) pour laquelle le vent a une vitesse  $v$ .

$$f(v) = \frac{k}{C} \times \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{C}\right)^k\right] \quad (1)$$

avec  $k$  le facteur de forme (sans unité) et  $C$  le facteur d'échelle (m/s).

La fonction de distribution cumulative de la vitesse  $v$  ou encore fonction de répartition de Weibull  $F(v)$  nous donne la fraction de temps (ou la probabilité) pour laquelle la vitesse du vent est inférieure ou égale à  $v$ .

$$F(v) = \int_0^v f(v) dv = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{C}\right)^k\right] \quad (2)$$

La vitesse moyenne du vent selon la distribution de Weibull s'obtient par la formule suivante:

$$V_m = \int_0^\infty v \times f(v) dv \quad (3)$$

La distribution de Weibull s'avère appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent [4-7].

#### 2.1.2. Estimation des paramètres de Weibull

Il existe plusieurs méthodes de détermination des paramètres  $k$  et  $C$  à partir des données de vent d'un site. Les plus courantes sont: la méthode graphique, la méthode de moment, la méthode de probabilité maximum, la méthode modifiée de probabilité maximum et la méthode 'standard déviation' [3, 6, 7]. Puisque les données de vent disponibles sont sous le format distribution des fréquences, la méthode recommandée est la méthode modifiée de probabilité maximum [7]. Les paramètres de Weibull sont déterminés à l'aide des équations (4) et (5) :

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \times \text{Ln}(v_i) \times f(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k \times f(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \text{Ln}(v_i) \times f(v_i)}{F(v \geq 0)} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$C = \left( \frac{1}{F(v \geq 0)} \times \sum_{i=1}^n v_i^k \times f(v_i) \right)^{1/k} \quad (5)$$

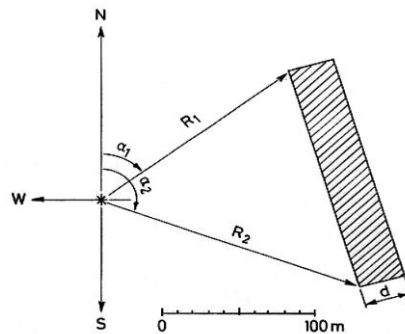
où  $v_i$  est le milieu de l'intervalle  $i$  des vitesses,  $n$  le nombre d'intervalles,  $f(v_i)$  la fréquence pour laquelle la vitesse de vent tombe dans l'intervalle  $i$ ,  $F(v \geq 0)$  la probabilité pour que la vitesse de vent soit supérieure ou égale à zéro.

L'équation (4) se résout numériquement par itération successive jusqu'à la convergence de la valeur de  $k$  grâce à un code que nous avons rédigé en fortran 90. Les calculs sont initialisés avec  $k = 2$ . Après convergence, l'équation (5) est maintenant résolue explicitement en utilisant la valeur de  $k$  pour trouver celle de  $C$ .

## 2.2 Modélisation d'un obstacle

Près d'un obstacle, tel qu'un bâtiment, le vent est fortement influencé. Le mât de l'anémomètre à l'aéroport est entouré de bâtiments et d'arbres, ce qui influence la collecte des données. L'exploitation de celles-ci nécessite de prendre en compte les différents obstacles du site.

Nous modélisons l'obstacle de la manière suivante:



Pour un observateur situé à la position de l'anémomètre et qui regarde un obstacle donné, on a:

- $\alpha_1$ , angle en ( $^\circ$ ) qui sépare le nord géographique du premier coin;
- $R_1$ , distance radiale en (m) jusqu'au premier coin;
- $\alpha_2$ , angle en ( $^\circ$ ) qui sépare le nord géographique du deuxième coin;
- $R_2$ : distance radiale en (m) jusqu'au deuxième coin;
- $h$ , hauteur de l'obstacle en (m);
- $d$ , profondeur de l'obstacle en (m);
- $p$ , estimation de la porosité de l'obstacle.

Nombre situé entre (0 -0.1 -0.2 - -0.9 -1).

Les angles sont mesurés de  $0^\circ$  (Nord) à  $360^\circ$  dans le sens des aiguilles d'une montre.

### 2.3 Modélisation de la rugosité

La rugosité, intuitivement, définirait des obstacles vus de loin, ou un ensemble de très petits obstacles ramenés à l'échelle du vent. Ses données sont empiriques et il n'existe pas de formules de calcul assez précises pour représenter toute la variété mouvante et vivante des brins d'herbe, des arbres qui poussent et des villes qui se construisent [8, 9].

La rugosité d'un terrain est très souvent paramétrée par une échelle de longueur appelée longueur de rugosité  $Z_0$ . Une relation empirique simple entre les éléments de rugosité et la longueur de rugosité a été formulée par Lettau en 1969 [10].

$$Z_0 = 0.5 \times (h \times S) / A_H \quad (6)$$

Où  $h$  est la hauteur de l'élément de rugosité en (m),  $S$ , sa section transversale face au vent en ( $m^2$ ) et  $A_H$ , la surface horizontale moyenne en ( $m^2$ ) délimitant la répartition de l'élément de rugosité en question.

### 2.4 Densité d'énergie éolienne

La puissance disponible dans un flot de vent de vitesse  $v$  s'obtient grâce à la relation:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (7)$$

où  $\rho$ , densité de l'air, ( $kg/m^3$ ), et  $A$ , surface balayée de la pale de l'éolienne, ( $m^2$ ).

Si nous exprimons cette puissance par unité de surface, alors on a:

$$P_v = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \quad (8)$$

La fraction de temps pour laquelle cette vitesse  $v$  prévaut dans le régime est donnée par la fonction densité de probabilité  $f(v)$ . Ainsi, l'énergie contribué par  $v$ , par unité de temps et par unité de surface, est  $P_v \times f(v)$ . Donc, l'énergie totale contribué par toutes les vitesses possibles dans le régime de vent, disponible pour une unité de surface et de temps (densité d'énergie  $E_D$ ) peut s'exprimer comme suit [3, 11, 12]:

$$E_D = \int_0^{\infty} P_v \times f(v) \times dv \quad (9)$$

## 3. ETAPES PREALABLES

### 3.1 Collecte des données

Les stations météorologiques pour des raisons de normalisation mesurent des caractéristiques du vent à 10 m du sol, toutefois les dimensions des aérogénérateurs commercialisés imposent des hauteurs importantes pouvant atteindre 190 m, pour les machines éoliennes de grande puissance [13].

Les données utilisées dans ce travail sont celles de la station météorologique de l'aéroport de Ngaoundéré. Les mesures de la vitesse moyenne du vent ont été effectuées à 10 m du sol. Elles correspondent à une durée de collecte de 12 mois. Les enregistrements sont effectués à 30 minutes d'intervalle, soit 17568 mesures.

La **Table 1** ne représente qu'un extrait de ces données.

**Table 1:** Extrait des données de vent collectées sous le format série-temporelle

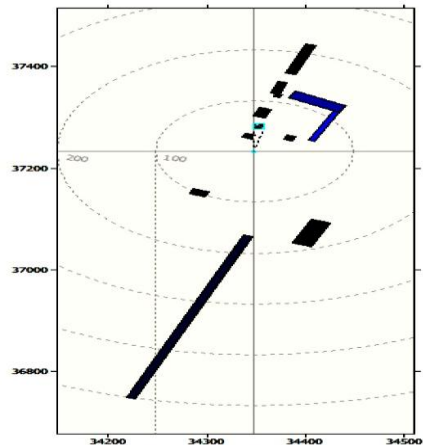
Date	Heure	Vitesse (m/s)	Direction
07/05/2011	06:00	0.0	-
//	06:30	0.9	ESE
//	07:00	1.8	SSE
//	07:30	2.7	S
//	08:00	3.1	SSW
//	08:30	3.1	S
//	09:00	3.1	SW
//	09:30	4.0	SW
//	10:00	4.0	SSW

### 3.2 Obstacles environnant le site de la collecte

La modélisation des obstacles a été réalisée à l'aide du logiciel WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program).



a- Vue aérienne du site



b- Obstacles modélisés

Fig. 1: Prise en compte des obstacles environnant le site de la collecte

### 3.3 Choix de l'aérogénérateur

La production en puissance d'une éolienne varie avec l'action du vent sur le rotor. En effet, la courbe de puissance est une représentation de la puissance développée en fonction de la vitesse. Le choix d'un aérogénérateur doit s'appuyer sur des critères, tels que: la vitesse de démarrage, la hauteur du mât, la puissance maximale développée et la masse volumique de l'air. L'aérogénérateur, que nous avons choisi pour notre site, est le modèle N100-2500 du constructeur Nordex.

**Table 2:** Caractéristiques de l'aérogénérateur Nordex N100-2500

Caractéristiques	Spécifications
Vitesse de démarrage	3.5 m/s
Hauteur du mât	140 m
Diamètre du rotor	100 m
Puissance maximale	2.5 MW
Masse volumique	1.025 kg/m <sup>3</sup>
Constructeur	Nordex Energy GmbH

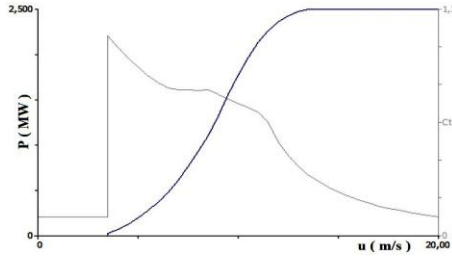


Fig. 2: Courbe de puissance de l'aérogénérateur Nordex N100-2500

**3.4 Traitement statistique des données**

a- Calcul de la vitesse moyenne arithmétique

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n v_i \tag{10}$$

b- Calcul de la vitesse moyenne pondérée arithmétique

$$\langle v \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \times f(v_i)}{\sum_{i=1}^n f(v_i)} \tag{11}$$

c- Calcul de la puissance moyenne par unité de surface (densité d'énergie)

$$\langle P \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n P(v_i) \times f(v_i)}{\sum_{i=1}^n f(v_i)} ; P(v_i) = \frac{1}{2} \times \rho \times v_i^3 \text{ alors } \langle P \rangle = \frac{1}{2} \times \frac{\sum_{i=1}^n v_i^3 \times f(v_i)}{\sum_{i=1}^n f(v_i)} \tag{12}$$

**4. RESULTATS DE LA SIMULATION NUMERIQUE**

**4.1 Potentiel éolien du site de l'aéroport à la hauteur de la collecte**

Les mesures de la vitesse du vent ont été regroupées en intervalle et associées à leurs fréquences sur le site. Ce mode de représentation nous donne des informations sur le nombre d'heures pour lesquelles la vitesse se situe dans un intervalle précis. Celles du site de l'aéroport de Ngaoundéré sont présentées à la **Table 3**.

**Table 3:** Vitesses du vent sous le format distribution de fréquences (m/s)

Vitesse de vent	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Fréquence (%)	51.0	16.3	14.8	12.0	4.8	0.9	0.1	0.1	0	0

Les paramètres de Weibull pour cette distribution des fréquences sont:  
 k = 1.23 et C = 1.7 m/s

Ces paramètres étant connus, il est possible de représenter sur un même graphique la fonction densité de probabilité et l'histogramme des fréquences de la vitesse (Fig. 3).

Le bilan annuel de cette distribution de fréquences de la vitesse du vent donne les informations suivantes:

- A partir des statistiques des mesures du site-
  - Vitesse maximale du site  $v_{max} = 9.4 \text{ m/s}$
  - Vitesse moyenne arithmétique  $\bar{v} = 1.46 \text{ m/s}$

- Vitesse moyenne pondérée arithmétique  $\langle v \rangle = 1.56 \text{ m/s}$
- Densité d'énergie  $\langle P \rangle = 7.5 \text{ W/m}^2$

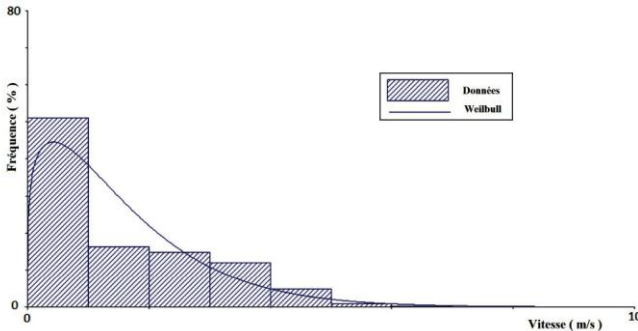


Fig. 3: Histogrammes des fréquences de la vitesse du vent modélisée par la distribution de Weibull

- A partir de la distribution de Weibull-
  - Vitesse moyenne  $V_m = 1.58 \text{ m/s}$
  - Densité d'énergie  $E_D = 7.8 \text{ W/m}^2$ .

#### 4.2 Atlas éolien de la ville de Ngaoundéré

Les caractéristiques du vent sont spécifiées pour un certain nombre de rugosité pris en référence (classes de rugosité) et de hauteurs prises par rapport au niveau du sol (Table 4). Ces caractéristiques sont indépendantes du site et de ce fait décrivent le comportement du vent de manière générale.

Table 4: Atlas éolien de la ville de NGaoundéré

		R-class 0 (0.000 m)	R-class 1 (0.030 m)	R-class 2 (0.100 m)	R-class 3 (0.400 m)	R-class 4 (1.500 m)
Hauteur 1 (z = 10 m)	v (m/s)	2.89	2.06	1.78	1.41	1.00
	P (W/m <sup>2</sup> )	47	21	14	6	2
Hauteur 2 (z = 25 m)	v (m/s)	3.16	2.46	2.20	1.86	1.51
	P (W/m <sup>2</sup> )	59	32	23	13	6
Hauteur 3 (z = 50 m)	v (m/s)	3.40	2.85	2.58	2.24	1.93
	P (W/m <sup>2</sup> )	71	42	32	21	12
Hauteur 4 (z = 100 m)	v (m/s)	3.68	3.37	3.07	2.71	2.43
	P (W/m <sup>2</sup> )	94	65	48	32	20
Hauteur 5 (z = 200 m)	v (m/s)	4.05	4.11	3.74	3.32	3.03
	P (W/m <sup>2</sup> )	132	122	92	62	39

#### 4.3 Prédiction du climat de vent à la hauteur du mât

Le mât de l'éolienne choisie a une hauteur de 140 m, hauteur bien supérieure à celle de la collecte (10 m). L'extrapolation verticale des vitesses de vent à l'axe de rotation de l'éolienne devient impérative, ce qui par conséquent entraîne une variation du mode de distribution du vent. Les caractéristiques du climat de vent sont résumées à la Table 5.

Pour l'ensemble des secteurs de ce site, la vitesse moyenne du vent  $V_m = 3,84$  m/s avec une densité d'énergie  $E_D = 104$  W/m<sup>2</sup>.

**Table 5:** Caractéristiques du vent et distribution des fréquences de la vitesse à 140 m par secteur

Numéro Secteur	Angle secteur (°)	Fréquence (%)	Weibull – C (m/s)	Weibull – C -	Vitesse moy. (m/s)
1	0	7.4	7.4	1.84	6.62
2	30	10.5	7.7	1.92	6.87
3	60	10.9	6.7	1.90	5.95
4	90	8.7	4.2	1.81	3.71
5	120	7.1	1.7	1.02	1.69
6	150	7.1	2.4	1.21	2.22
7	180	6.3	2.7	1.37	2.49
8	210	10.9	3.7	1.77	3.28
9	240	8.7	3.2	1.71	2.88
10	270	6.0	2.4	1.41	2.16
11	300	7.2	2.7	1.47	2.48
12	330	8.5	3.8	1.57	3.38

#### 4.4 Prédiction de l'énergie électrique fournie

La production annuelle de l'énergie électrique est calculée pour les 12 secteurs de la rose des vents (Fig. 4 et **Table 6**). En prenant en compte des caractéristiques de l'aérogénérateur que nous avons choisi, l'énergie annuelle pour tous les secteurs cumulés est de 2 348 MWh, soit une puissance moyenne développée de 267 kW.

**Table 6:** Densité d'énergie éolienne et énergie électrique annuelle produite par secteur

Numéro Secteur	Angle secteur (°)	Densité d'énergie (W/m <sup>2</sup> )	Production annuelle (MWh)
1	0	309	488
2	30	330	735
3	60	216	574
4	90	56	127
5	120	14	22
6	150	22	39
7	180	25	36
8	210	40	107
9	240	28	56
10	270	15	18
11	300	22	35
12	330	51	111

Le secteur 2 est le plus gros contributeur de l'énergie totale avec (31.3 %) soit 735 MWh. Viennent ensuite les secteurs 3 et 1 avec respectivement (24.4 %) et (20.8 %), soit 574 MWh et 488 MWh.

Sachant que l'on souhaite installer 10 aérogénérateurs, l'énergie totale annuelle du site espéré est de 23 480 MWh soit une puissance moyenne développée de 2.67 MW.

D'après les statistiques de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), l'estimation des émissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion du fuel pour la production d'électricité au Cameroun s'élèvent à 207 g/kWh [14]. Ce parc éolien nous permettrait ainsi d'éviter de rejeter dans l'environnement 4861 tonnes de CO<sub>2</sub> par an.



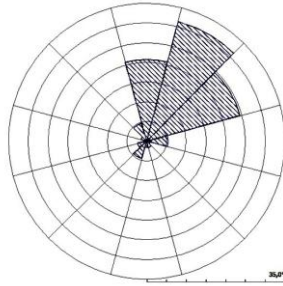


Fig. 4: Energie électrique produite estimée par secteur

#### 4.5 Orientation des éoliennes

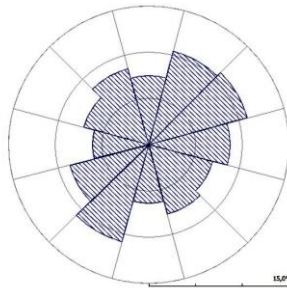


Fig. 5: Rose de vent du site de Ngaoundéré

L'observation et l'analyse des statistiques du vent montrent qu'il y a prédominance du vent dans la direction Nord-Est. Malgré une fréquence des vitesses importante au secteur 8, la vitesse moyenne du vent reste faible. La plus élevée en revanche, est enregistrée au secteur 2 (**Table 5**). En outre, ce secteur avec le 1 et le 3 sont les plus gros contributeurs à l'énergie totale.

Ce bilan annuel permet d'opter pour le Nord-Est, plus précisément une inclinaison par rapport au Nord d'un angle géométrique variant entre le premier et le quatrième secteur (entre  $15^\circ$  et  $75^\circ$ ) avec une préférence pour le secteur 2 (entre  $15^\circ$  et  $45^\circ$ ) où les vents sont dominants.

#### 4.6 Analyse de la turbulence du vent

Les variations moyennes sur l'année servent parfois à définir le vent ou les vents (parfois bien différents) qui visitent régulièrement le site. Les plus courants à Ngaoundéré sont l'harmattan et la mousson.

Cette mesure permet également de voir, selon ce que l'on souhaite faire de la production électrique des éoliennes, si cette production est, en moyenne, en phase ou non avec les consommateurs d'électricité, et avec d'autres formes de production d'électricité. On pourrait en partie expliquer ces variations par le changement de la rugosité dû à l'alternance des saisons.

L'étude des variations moyennes journalières permet de savoir s'il y aura une continuité de service (production d'électricité permanente) au niveau de la station. L'observation du tracé montre que la vitesse du vent est très faible, voire quasiment nulle entre 19 heures et 06 heures temps universelle.

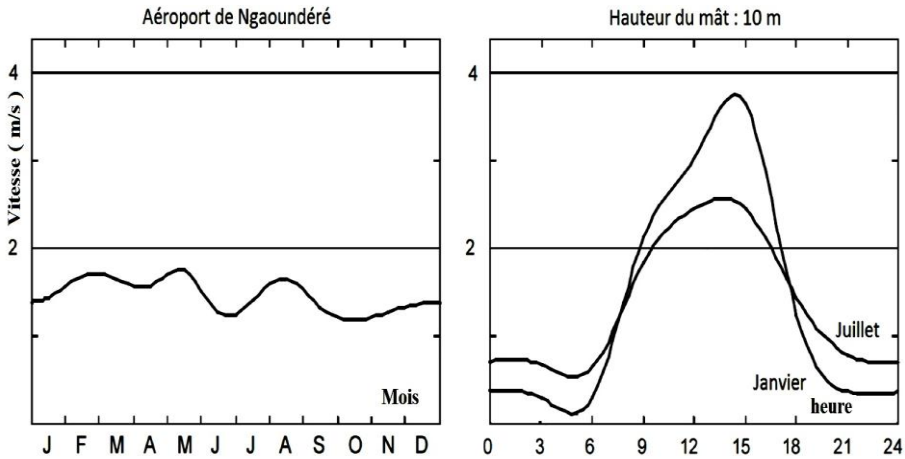


Fig. 6. Variations moyennes de la vitesse sur l'année et dans une journée

Cette station devra être:

- soit couplé à un réseau local existant pour le renforcement de l'offre énergétique;
- soit dotée d'un dispositif de stockage conséquent (pour une zone isolée) afin d'assurer une continuité de service.

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Sur le site de l'aéroport de Ngaoundéré, les vents ont une prédominance autour de la direction Nord-Est et sont relativement faibles ceci en raison de la présence d'un obstacle naturel placé en amont.

Le potentiel éolien de ce site à 140 m de hauteur présente une vitesse moyenne de 6.87 m/s et une densité d'énergie de 330 W/m<sup>2</sup> pour le secteur privilégié (secteur 2).

L'installation d'un parc éolien de 10 aérogénérateurs permettra de renforcer la capacité électrique installée d'une production annuelle d'énergie d'environ 23 480 MWh et permettrait ainsi d'éviter la libération de 4861 tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'environnement. La représentation des variations moyennes journalières de la vitesse montrent qu'il ne peut y avoir continuité de service dans une station de ce site.

Enfin, les valeurs des paramètres mesurées et calculées statistiquement sont très proches des valeurs issues de l'approximation par la modélisation mathématique de la distribution de Weibull, ce qui valide l'usage de ce modèle à des fins de prédictions.

Les perspectives de ce travail visent d'une part la prise en compte, dans nos simulations numériques, des interactions entre éoliennes encore appelées effet de sillage ceci afin de fournir une estimation correcte de la production énergétique d'un parc éolien.

D'autre part, la prise en compte du relief permettra d'envisager la prédiction énergétique d'une installation éolienne à un site autre que celui de la collecte.

**Remerciements:** Les auteurs adressent leurs vifs remerciements d'une part à l'ASECNA Ngaoundéré pour les données météorologiques et d'autre part au Risø National Laboratory, Department of Wind Energy, Technical University of Denmark.

## NOMENCLATURE

<p>v : Vitesse du vent, m/s</p> <p><math>z_0</math> : Longueur de rugosité, m</p> <p><math>v_{\max}</math> : Vitesse maximale du site, m/s</p> <p>n : Nombre d'intervalle de vitesse</p> <p>h : Hauteur de l'élément de rugosité, m</p> <p><math>\bar{v}</math> : Vitesse moy. arithmétique du vent, m/s</p> <p>P : Puissance dans un flot de vent de vitesse <math>v</math>, W</p> <p><math>F(v)</math> : Fonction de distribution cumulative de la vitesse</p> <p><math>\langle P \rangle</math> : Densité d'énergie éolienne obtenue à partir des mesures, <math>W/m^2</math></p> <p>S : Aire de la section transversale de l'obstacle face au vent, <math>m^2</math></p> <p><math>E_D</math> : Densité d'énergie éolienne calculée au moyen de la distribution de Weibull, <math>W/m^2</math></p>	<p>C : Facteur d'échelle, m.s</p> <p>z : Hauteur de mesure, m</p> <p>k : Facteur de forme de la courbe</p> <p><math>\rho</math> : Masse volumique de l'air, <math>kg/m^3</math></p> <p>f(v) : Fonction densité de probabilité</p> <p><math>P_v</math> : Puissance par unité de surface, <math>W/m^2</math></p> <p><math>\langle v \rangle</math> : Vitesse moy. Pondérée arithmétique du vent, m/s</p> <p><math>A_H</math> : Aire de la surface hori. délimitant la répartition de l'élément de rugosité, <math>m^2</math></p> <p>A : Aire de la surface balayée de la pale de l'éolienne, <math>m^2</math></p> <p>R – class : Roughness class (classe de rugosité), m</p> <p><math>V_m</math> : Vitesse moyenne du vent au moyen de la distribution de Weibull, <math>W/m^2</math></p>
---	---

## REFERENCES

- [1] Observ'ER, EDF, '*La Production d'Electricité d'Origine Renouvelable dans le Monde*', Observatoire des Energies Renouvelables, 14<sup>ème</sup> inventaire, Edition 2012. Available from <http://www.observ-er.org/observ-er/html/inventaire/Fr/preface.asp> [Accessed 13 January 2013].
- [2] P. Michalak and J. Zimny, '*Wind Energy Development in the World, Europe and Poland From 1995 to 2009 - Current Status and Future Perspectives*', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, N°5, pp. 2330 – 2341, 2011..
- [3] M. Sathyajith and S.P. Geeta, '*Advances in Wind Conversion Technology*', Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2011.
- [4] H. Faïda, J. Saadi, M. Khaïder, S. El Alami et M. Monkade, '*Etude et Analyse des Données du Vent en Vue de Dimensionner un Système de Production d'Energie Eolienne- Cas d'un Site au Nord du Maroc*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13, N°3, pp. 477 – 483, 2010.
- [5] M. Benabdelkader, A. Malek et B. Draoui, '*Perspectives du Pompage Eolien Appliqué à l'Irrigation du Palmier Dattier dans la Région de Béchar*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, N°3, pp. 381 – 395, 2011.
- [6] M. Sathyajith, '*Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*', Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [7] J.V. Seguro and T.W. Lambert, '*Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis*', Journal of Wind Energy Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 85, N°1, pp. 75 – 84, 2000.
- [8] C. Dubois, '*Le Guide de l'Eolien, Techniques et Pratiques*', Editions Eyrolles, Paris, 2009.
- [9] H.W. Tieleman, '*Roughness Estimation for Wind-Load Simulation Experiments*', Journal of Wind Energy Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 91, N°9, pp. 1163 – 1173, 2003.

- [10] H. Lettau, 'Note on Aerodynamic Roughness - Parameter Estimation on the Basis of Roughness - Element Description', *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 8, N°5, pp. 828 – 832, 1969.
- [11] L. Meishen and L. Xianguo, 'MEP-Type Distribution Function: A Better Alternative to Weibull Function for Wind Speed Distributions', *Renewable Energy*, Vol. 30, N°8, pp. 1221 – 1240, 2005.
- [12] M. Jamil, S. Parsa and M. Majidi, 'Wind Power Statistics and Evaluation of Wind Energy Density', *Renewable Energy*, Vol. 6, N°5-6, pp. 623 - 628, 1995.
- [13] M. Rapin et J.M. Noël, 'Energie Eolienne, Principes - Etude de Cas', Ed. Dunod, Paris, 2010.
- [14] IEA Statistics, 'CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion, Highlights', International Energy Agency, 2012. Available from <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2emissionfromfuelcombustionhighlights.pdf> [Accessed 13/01/2013].