

MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE DES DONNEES DU VENT EN VUE D'UNE PREDICTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE D'ORIGINE EOLIENNE : CAS D'UN SITE DE LA VILLE DE NGAOUNDERE AU CAMEROUN

Myrin Kazet¹, Ruben Mouangue^{1§}, Sylvar Takam²

¹Laboratoire de combustion et de Technologie Verte, IUT, PAI, Ngaoundéré, Cameroun

²Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar, Ngaoundéré, Cameroun

[§]Correspondence author. Email: r_mouangue@yahoo.fr

RESUME : 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, tel 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.

Mots clés -Eolienne, conversion d'énergie, modélisation, simulation numérique, Ngaoundéré

INTRODUCTION

De nos jours, la part des énergies renouvelables ne représente qu'environ 20 % 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 considérable en Afrique [1, 2].

Pour préparer un développement réellement durable, l'une des mesures serait d'accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité. C'est pourquoi une phase d'étude 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 importantes qu'offre le gisement éolien du Cameroun.

MODELISATION MATHEMATIQUE

Modélisation de la Distribution des Fréquences du Vent

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 distribution cumulative.

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

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

avec k facteur de forme (sans unité) et C facteur d'échelle en (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 :

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

La distribution de Weibull décrit raisonnablement bien la distribution des fréquences des vitesses du vent [4, 5].

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 de déviation standard [3, 4, 5]. Puisque les données de vent disponibles sont sous le format distribution des fréquences, la méthode recommandée est la méthode modifiée de probabilité maximum [5]. Les paramètres de Weibull sont estimés en utilisant les deux équations suivantes :

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

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

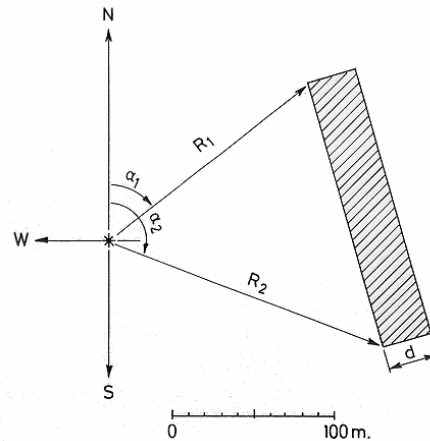
où v_i est le milieu de l'intervalle des vitesses i , n le nombre d'intervalles, $f(v_i)$ la fréquence pour laquelle la vitesse de vent tombe dans l'intervalle i , $F(v \geq 0)$ la probabilité pour que la vitesse de vent soit supérieure ou égale à zéro.

L'équation (4) se résout par itération ensuite l'équation (5) est résolue explicitement.

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 manière suivante :



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

- α_1 angle en ($^\circ$) qui sépare le nord géographique du premier coin ;
- r_1 distance radiale en (m) jusqu'au premier coin ;
- α_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° (Nord) à 360° dans le sens des aiguilles d'une montre.

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 formule 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 [12].

$$Z_0 = \frac{0.5(h.S)}{A_H} \quad (6)$$

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.

Densité d'énergie éolienne La puissance disponible dans un flot de vent de vitesse v s'obtient grâce à la relation :

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

où ρ est la densité de l'air en (kg/m^3), A la surface balayée de la pale de l'éolienne en (m^2).

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

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

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 $P_v f(v)$. 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, 6, 7] :

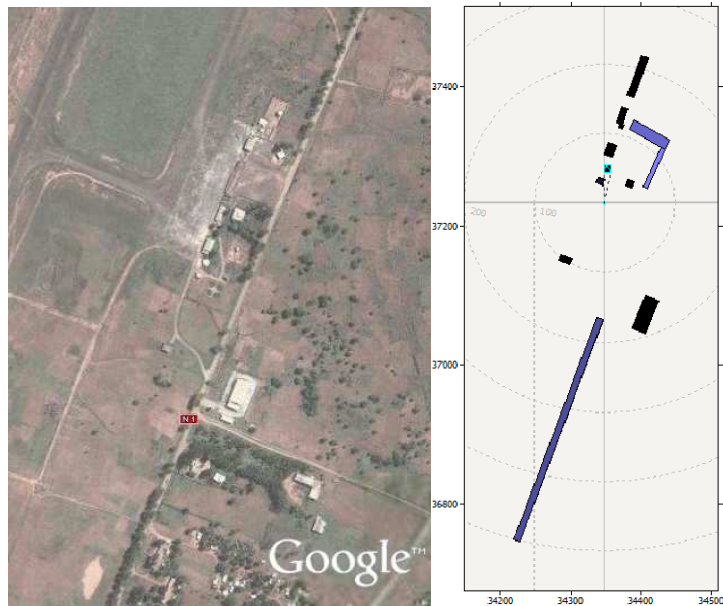
$$E_D = \int_0^{\infty} P_v f(v) dv \quad (9)$$

ÉTAPES PRÉALABLES

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 [11].

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.

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

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

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

descritères tels que : la vitesse de démarrage, la hauteur du mât, la puissance maximale développée et la masse volumique de l’air.

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 (air)	1,025 kg/m ³
Fabriquant	NordexEnergyGmbH

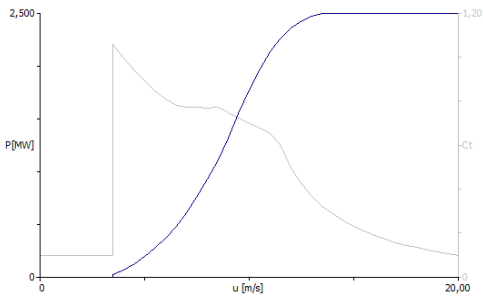


Figure 2. Courbe de puissance de l’aérogénérateur Nordex N100-2500

Traitement statistique des données

– Calcul de la vitesse moyenne arithmétique :

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

– Calcul de la vitesse moyenne pondérée arithmétique :

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

– Calcul de la puissance moyenne par unité de surface (densité d’énergie) :

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

RÉSULTATS DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE

Potentiel éolien du site de l’aéroport à la hauteur de la collecteLes données du vent sous forme de distribution de fréquence nous donnent des informations sur lenombre 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

Vitesse de vent (m/s)	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 $C = 1,7$.

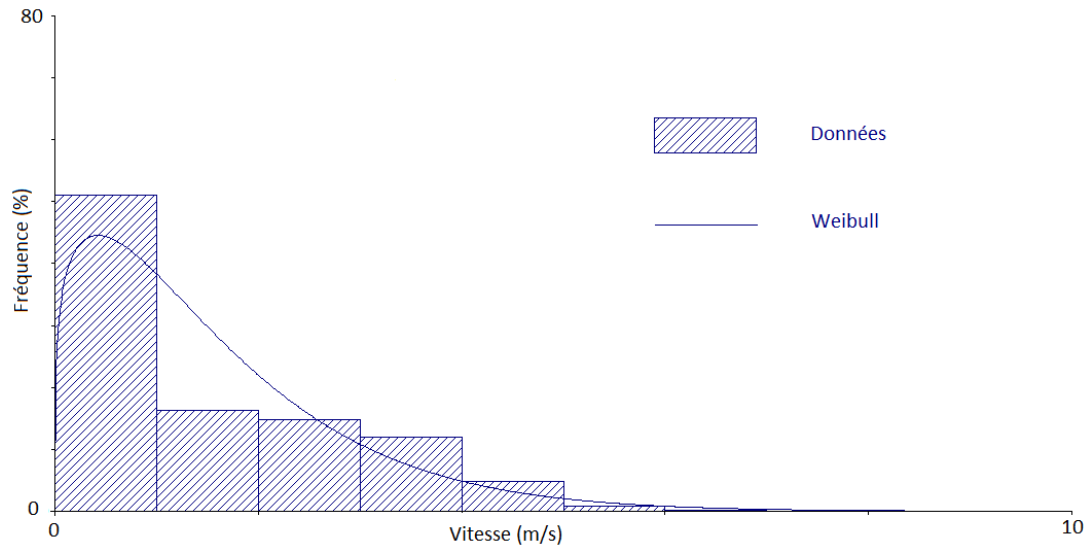


Figure 3. Histogrammes des fréquences de la vitesse du vent modélisée par la distribution de Weibull

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

- A partir des statistiques des données du site :
 - Vitesse maximale du site $v_{max} = 9,4$ m/s
 - Vitesse moyenne arithmétique $= 1,46$ m/s
 - Vitesse moyenne pondérée arithmétique $\langle v \rangle = 1,56$ m/s
 - Densité d'énergie $\langle P \rangle = 7,5$ W/m²
- A partir de la distribution de Weibull :
 - Vitesse moyenne $V_m = 1,58$ m/s
 - Densité d'énergie $E_D = 7,8$ W/m²

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 climat de 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)
Height 1 (z=10 m)	U [m/s] P[W/m ²]	2,89 47	2,06 21	1,78 14	1,41 6	1,00 2
Height2 (z=25 m)	U [m/s] P[W/m ²]	3,16 59	2,46 32	2,20 23	1,86 13	1,51 6
Height3 (z=50 m)	U [m/s] P[W/m ²]	3,40 71	2,85 42	2,58 32	2,24 21	1,93 12
Height4 (z=100 m)	U [m/s] P[W/m ²]	3,68 94	3,37 65	3,07 48	2,71 32	2,43 20
Height5 (z=200 m)	U [m/s] P[W/m ²]	4,05 132	4,11 122	3,74 92	3,32 62	3,03 39

Prédiction du climat de vent à la hauteur du mât Le mât de l'éolienne choisi a une hauteur de 140 m, hauteur bien supérieure à celle de la collecte (10m). 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/m².

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

Numéro du Secteur	Angle du secteur (°)	Fréquence (%)	Weibull- C (m/s)	Weibull – k -	Vitesse moyenne (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

Prédiction de l'énergie électrique fournie La production annuelle de l'énergie électrique est calculée par secteur (Table 6). Selon les caractéristiques de l'aérogénérateur 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 du secteur	angle du secteur (°)	Densité d'énergie (W/m ²)	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

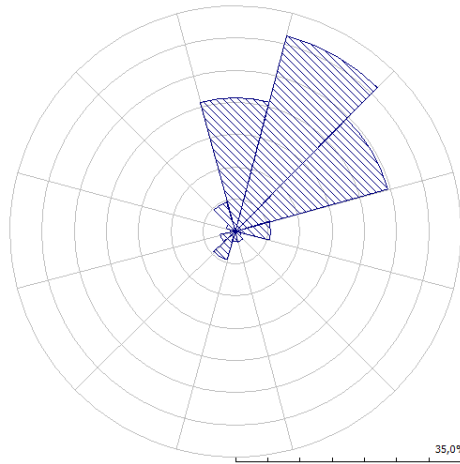


Figure 4. Prédiction de l'énergie éolienne

Le secteur 2 est le plus gros contributeur de l'énergie totale (31,3 %) soit 735 MWh. Viennent ensuite les secteurs 3 et 1 avec respectivement (24,4 %) et (20,8 %) soit 574 MWh et 488MWh.

Sachant que l'on souhaite installer 10 aérogénérateurs, l'énergie totale annuelle du site espérée 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_2 dues à la combustion du fuel pour la production d'électricité au Cameroun s'élève à 243 g/KWh[10]. Ce parc éolien nous permettrait ainsi d'éviter de rejeter dans l'environnement 5706 tonnes de CO_2 par an.

Orientation des éoliennes

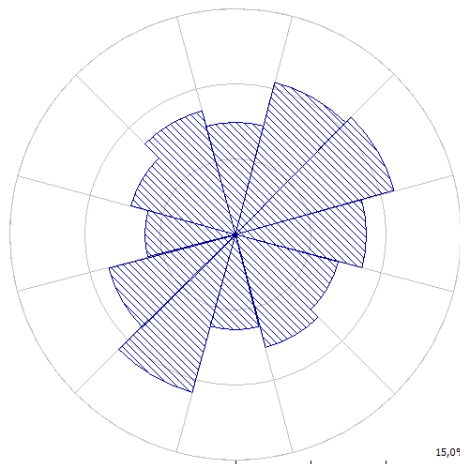


Figure 5. Rose de vent du site de Ngaoundéré

L'observation et l'analyse des statistiques du vent montrent qu'il y a prédominance de vent dans la direction Nord - Est. Malgré une fréquence des vitesses importante au secteur 8, la vitesse moyennée du vent reste faible et la plus élevée est enregistrée au secteur 2. De plus, 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° et 75°) avec une préférence pour le secteur 2 (entre 15° et 45°) où les vents sont dominants.

Analyse de la turbulence du vent

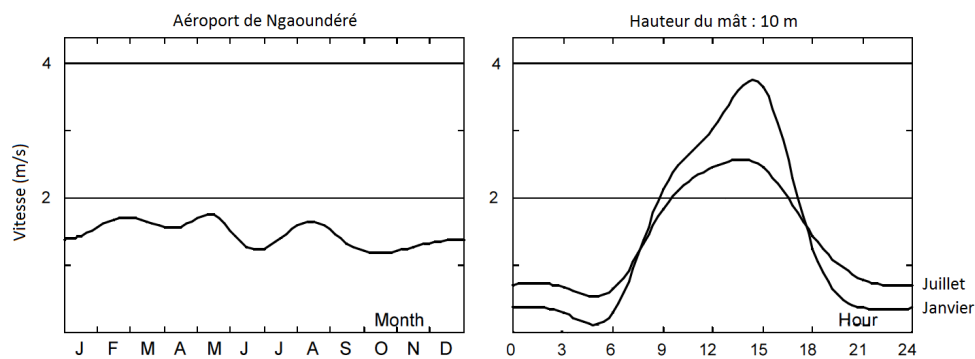


Figure 6. Variations moyennes de la vitesse sur l'année et dans une journée

Les variations moyennes sur l'année servent parfois à définir le vent ou les vents (parfois biendifférents) qui visitent régulièrement le site. Les plus courant à Ngaoundéré sont l'harmattan et lamousson. Cette mesure permet également de voir, selon ce que l'on souhaite faire de la productionélectrique des éoliennes, si cette production est, en moyenne, en phase ou non avec les consommateursd'électricité, et avec d'autres formes de production d'électricité [8]. On pourrait en partie expliquerces 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 lavitesse du vent est très faible voire quasiment nulle entre 19 heures et 06 heures temps universelle.

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 continuitéde service.

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 enamont. Le potentiel éolien de ce site à 140 m de hauteur présente une vitesse moyenne de 6,87 m/set une densité d'énergie de 330 W/m²pour le secteur privilégié (secteur 2). L'installation d'un parcéolien de 10 aérogénérateurs permettra de renforcer la capacitéélectrique installée d'une productionannuelle d'énergie de 23 480 MWh et permettrait ainsi d'éviter la libération de 5706 tonnes de CO₂dans l'environnement. La représentation des variations moyennes journalières de la vitesse montrentqu'il ne peut y avoir continuité de service dans une station de ce site. Enfin, Les valeurs des paramètresmesurées et calculées statistiquement sont très proches des valeurs issues de l'approximation par lamodélisation mathématique de la distribution de Weibull ce qui valide l'usage de ce modèle à des finsde 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 estimationcorrecte de la production énergétique d'un parc éolien. D'autre part, la prise en compte du reliefpermettra d'envisager la prédiction énergétique d'une installation éolienne à un site autre que celui dela collecte.

RÉFÉRENCES

- [1] Observ'ER, EDF [2011], La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. Observatoire des énergies renouvelables. treizième inventaire, édition 2011. Available from <http://www.observ-er.org/observ-er/html/inventaire/Fr/preface.asp> [Accessed 19 August 2012].
- [2] Michalak P., Zimny J. [2011], Wind energy development in the world, Europe and Poland from 1995 to 2009 - current status and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011) 2330 - 2341.
- [3] Sathyajith M. and Geeta S.P. [2011], *Advances in Wind Conversion Technology*, Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
- [4] Sathyajith M. [2006], *Wind Energy Fundamentals, Resource analysis and economics*, Springer - Verlag Berlin Heidelberg.
- [5] Seguro J.V., Lambert T.W. [2000], Modern estimation of the parameters of the Weibull windspeed distribution for wind energy analysis, *Journal of wind energy engineering and industrial aerodynamics*, 85 (2000) 75 - 84.
- [6] Meishen L., Xianguo L. [2005], MEP-type distribution function : a better alternative to Weibull function for wind speed distributions, *Renewable Energy*, 30 (2005) 1221 - 1240.
- [7] Jamil M., Parsa S., Majidi M. [1995], Wind power statistics and evaluation of wind energy density, *Renewable Energy*, Vol. 6, No. 5-6, pp. 623 628.
- [8] Dubois C. [2009], *Le guide de l'éolien, Techniques et pratiques*, Éditions Eyrolles, Paris.
- [9] Tieleman H.W. [2003], Roughness estimation for wind-load simulation experiments, *Journal of wind energy engineering and industrial aerodynamics*, 91 (2003) 1163 - 1173.
- [10] IEA Statistics [2011], CO₂ emissions from fuel combustion, highlights. International Energy Agency. Available from <http://www.iea.org> [Accessed 01 August 2012].
- [11] Rapin M., Noël J.M. [2010], *Énergie éolienne, principes - Étude de cas*, DUNOD, Paris.
- [12] Lettau H. [1969], Note on aerodynamic roughness - Parameter estimation on the basis of roughness- Element description, *Journal of Applied Meteorology*, Volume 8, p. 828 - 832.