

Etude et analyse des données du vent en vue de dimensionner un système de production d'énergie éolienne Cas d'un site au nord du Maroc

H. Faïda^{1*}, J. Saadi², M. Khaider³, S. El Alami⁴ et M. Monkade³

¹ Centre du Développement des Energies Renouvelables
B.P. 509, Rue Machaar El Haram, Issil, Marrakech, Maroc

² Université Hassan II - Ain Chock, Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique, 'ENSEM'
Laboratoire d'Informatique Systèmes et Energies Renouvelables, 'LISER'
Route d'El jadida Km 7, B.P. 8118, Oasis, Casablanca, Maroc

³ Université Chouaib Doukkali, Faculté des Sciences d'El Jadida,
Laboratoire de Physico-Chimie des Matériaux, Equipe O.E.S,
Route Ben Maachou, B.P. 20; 24000 El Jadida, Maroc

⁴ Université Hassan 1^{er}, Settat, Faculté des Sciences et Technique, FST
Laboratoire Mécanique, B.P. 577 Route de Casablanca, Settat, Maroc

(reçu le 20 Juin 2010 – accepté le 25 Septembre 2010)

Résumé - Ce travail de recherche consiste à l'étude d'une phase au préalable, permettant d'apporter une aide efficace, à tous ceux qui ont à prendre des décisions concernant la planification et la réalisation de projets à Energie éolienne. Dans cette perspective, nous avons commencé 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 des données réelles relatives au vent collectées pendant douze mois, afin de dimensionner un parc éolien sur un site au Maroc. On a évalué son potentiel éolien, sa prédiction de l'énergie électrique produite dans le site en question, tout en se basant sur un choix judicieux d'aérogénérateurs, la détermination automatique de la direction des éoliennes dans le site ainsi que l'analyse de la turbulence du vent.

Abstract - This research involves the study of a first phase, to provide effective assistance to those who make decisions regarding planning and implementation of Energy wind projects. In this perspective, we began by determining the various parameters related to wind, as the mathematical modeling of the frequency distribution of wind distribution Weibull, then processing and simulation of actual data collected in the wind for twelve months to size of a wind farm at a site in Morocco. It has been estimated wind power potential, his prediction of the electrical energy produced in the site in question while relying on a judicious choice of wind turbines, the automatic determination of the direction of the wind turbines on the site and the analysis of wind turbulence.

Mots clés: Parc Eolien - Données relatives au vent - Aérogénérateurs - Potentiel éolien - Distribution de Weibull.

1. OBJECTIF GENERAL DE L'ETUDE

Afin d'optimiser l'exploitation des parcs éoliens, certaines mesures doivent être prises en compte. En effet, un mauvais choix de certains paramètres pourra porter préjudice à une installation éolienne.

* faida122@yahoo.fr

C'est pourquoi une phase d'étude au préalable se révèle d'un extrême intérêt dans la mesure où on pourra dégager les conditions et contraintes à en tenir compte dans la réalisation d'un projet éolien.

Il faut donc passer par une étude et analyse de la climatologie du site considéré, car une bonne connaissance de ce site permet une meilleure exploitation et production de l'énergie électrique.

Et par conséquent, l'objectif général du travail est de contribuer au développement des sources énergétiques nationales pour l'approvisionnement en Electricité en profitant des potentialités importantes du gisement éolien au Maroc.

2. MODELISATION MATHEMATIQUE DE LA DISTRIBUTION DES FREQUENCES DU VENT

2.1 Distribution de Weibull [1-3]

Comme c'est difficile de manipuler l'ensemble des données relatives à une distribution de la fréquence du vent, il est plus convenable pour des considérations théoriques, de modéliser l'histogramme des fréquences des vitesses du vent par une fonction mathématique continue que par une table de valeurs discrète.

On peut donc opter pour le modèle de Weibull. En effet, pour des périodes allant de quelques semaines jusqu'à une année, la fonction de Weibull représente raisonnablement les vitesses observées. Il s'agit d'une fonction de densité de probabilité, s'exprimant sous la forme:

$$P(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \quad (1)$$

Avec: $P(V)$ est la densité de probabilité de la vitesse V ; K le facteur de forme de la courbe (sans dimension) et C le facteur d'échelle de la courbe en m/s.

La vitesse moyenne du vent peut être trouvée en intégrant la fonction densité de probabilité, soit donc la formule (1):

$$V_{\text{moy}} = \int V \times P(V) \times dV \quad (2)$$

Ainsi, la distribution de Weibull peut faciliter beaucoup de calculs rendus nécessaires par l'analyse des données du vent.

2.2 Détermination des paramètres de Weibull [2, 3]

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer K et C à partir d'une distribution de vent donnée:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1.125 \times V_{\text{moy}}}{(1 - B)} \\ K &= 1 + 0.483(V_{\text{moy}} - 2)^{0.51} \\ B &= 1 - 0.81(V_{\text{moy}} - 1)^{0.089} \end{aligned} \quad (3)$$

Cette fonction densité de probabilité s'appelle la distribution de Rayleigh, lorsque $K = 2$.

3. TECHNIQUES DE DIMENSIONNEMENT [1, 2, 5]

3.1 Puissance éolienne

$$P = \frac{1}{2} \rho \times S \times V^3 \tag{4}$$

$$V_{\text{moy}} = \sum V_i \times f_i \tag{5}$$

La lettre ρ désigne la densité de l'air (kg/m^3). V est la vitesse moyenne du vent en (m/s).

3.2 Energie fournie par un aérogénérateur

$$E = T_h \times \sum P_i (V) \times f_i (V) \tag{6}$$

Avec: E est l'énergie produite en kWh, T_h la période de temps en heure et $P_i (V)$ est la puissance en kW donnée par aérogénérateur à la vitesse V_i .

3.3 Facteur de capacité

$$C(\%) = \frac{(100 \times P_{\text{moy}})}{P_{\text{max}}} \tag{7}$$

3.4 Nombre total des éoliennes à placer dans le site [1]

Conditions à respecter:

$$(N1 + 1) \times 10H < I$$

$$(N2 + 1) \times 3D < L \tag{8}$$

$$N = N2 \times N1$$

- ◆ I = Dimension du terrain perpendiculaire à la direction prédominante du vent
- ◆ L = Dimension du terrain parallèlement à la direction prédominante du vent
- ◆ D = Diamètre du rotor de la machine
- ◆ H = Hauteur du pylône
- ◆ $N1$ = Nombre d'aérogénérateurs par rangée
- ◆ $N2$ = Nombre de rangée d'aérogénérateurs
- ◆ N = Nombre total d'aérogénérateurs à placer sur le site.

4. PRESENTATION DES RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT [1]

4.1 Potentiel éolien du site de Tanger [3, 5]

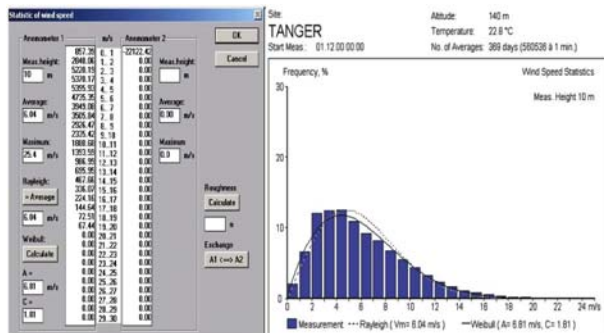


Fig. 1: Potentiel éolien du site de Tanger

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

- La vitesse moyenne du site est de 6.04 m/s.
- La vitesse maximale du site est de 25.4 m/s.
- Les vitesses prédominantes du site varient entre 2.5 m/s et 11 m/s.

4.2 Prédiction de l'énergie [3, 5]

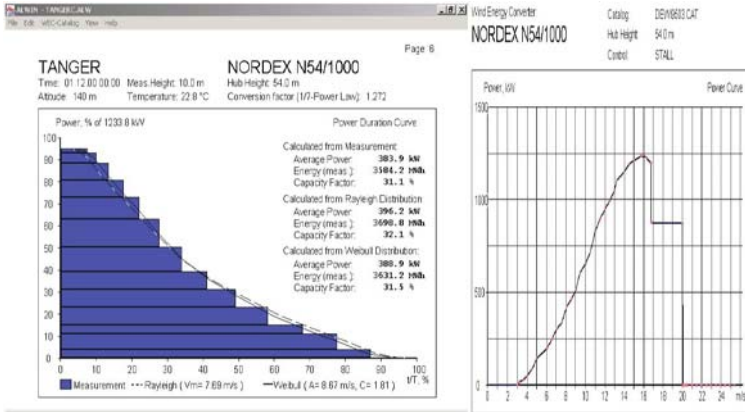


Fig. 2: Prédiction de l'énergie éolienne

- Le choix 'Nordex N54/1000', de $P_n = 1$ MW permet de produire une énergie de 3.69 GWh annuellement par chaque aérogénérateur.
- Sachant que la puissance installée est de 140 MW, soit 140 aérogénérateurs, l'énergie annuelle du site est de 516.6 GWh.

4.3 Orientation des éoliennes [3, 5]

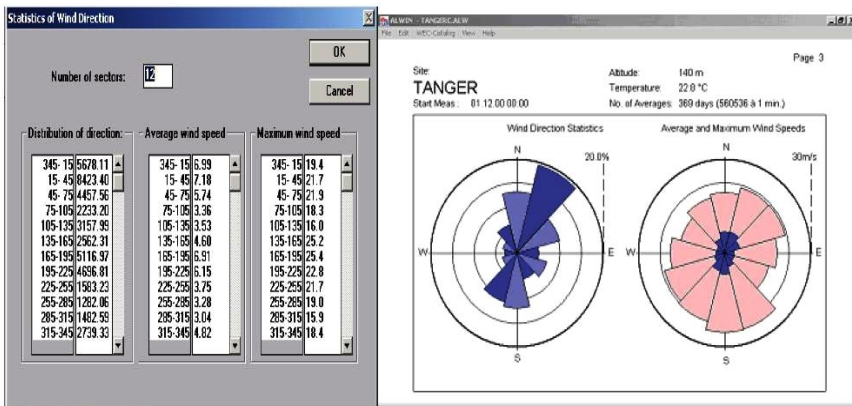


Fig. 3: Rose du vent du site de Tanger

Le bilan annuel permet d'opter pour le nord-est, et plus précisément une inclinaison par rapport au Nord d'un angle géométrique variant entre le premier et le troisième secteur (entre 15° et 45°).

4.4 Courbe de calme ‘Modèle journalier/courbe de calme’ [5]

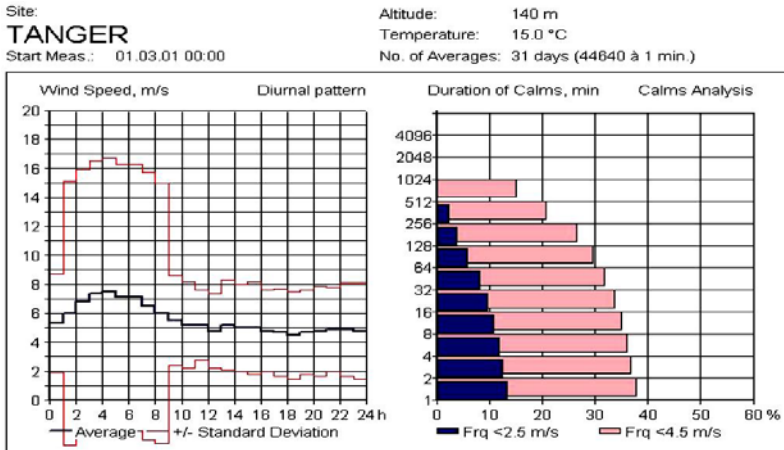


Fig. 4: Modèle journalier/courbe de calme

L’analyse de la turbulence du vent dans le site, à travers la courbe du modèle journalier permet de voir s’il y a une continuité de service (Production d’électricité permanente) au niveau de la station.

D’autre part, la courbe de calme de la station sous forme de bâtons présenté sur la figure 4 indique le pourcentage des fréquences cumulées pour des vitesses inférieures à 2.5 m/s et 4.5 m/s et qui demeurent pendant un certain temps de calme, la détermination de la fréquence de calme est nécessaire pour connaître la vitesse de démarrage de la machine qui sera utilisée ainsi que pour la détermination de la capacité de stockage des batteries intégrés dans les systèmes d’électrification isolés (autonomes), pour assurer la continuité du service.

5. CHOIX DE LA TECHNOLOGIE D’AEROGENERATEUR LA PLUS ADAPTEE [4, 6-8]

Tableau 1: Récapitulatif des différentes technologies des éoliennes [6-8]

Contrôle de la vitesse	Type de la génératrice	Puissance réactive	Perturbation créé dans le réseau	Remarque
Vitesse fixe avec multiplicateur de vitesse	Synchrone	Peut être contrôlé par le courant d’excitation	Oscillation mécanique car le générateur est lié à la fréquence du réseau (flicker)	Plus utilisé dans les grandes unités
	Asynchrone	Exige un dispositif de correction de $\cos(\varphi)$	Exige un système à démarrage doux Génération flicker	Utilisation dans le passé dans les petites unités
Vitesse adaptable, certaines limites Multiplicateur de vitesse	Asynchrone à adaptation du glissement par résistance rotorique	Exige un dispositif de correction de $\cos(\varphi)$	- Dispositif de démarrage doux - Harmonique possible adaptation de glissement.	Mauvais rendement
Rotor à vitesse Variable avec	Asynchrone à double	Energie réactive contrôle par le	- Flicker réduit mais - Problème des	Solution techniquement

	alimentation	convertisseur de fréquence de rotor.	harmoniques	intéressante; voir coût de l'investissement
Multiplicateur de vitesse	Asynchrone avec rotor double enroulement	Exige un dispositif de correction de $\cos(\varphi)$	Exige un système à démarrage doux	Solution techniquement intéressante, voir coût de l'investissement
Rotor à vitesse Variable sans Multiplicateur de vitesse	Synchrone multipole	Peut être contrôlé par le courant d'excitation	Peu de perturbation réseaux.	Solution techniquement intéressante mais coût important par rapport à la MADA.

- Machine asynchrone à double alimentation

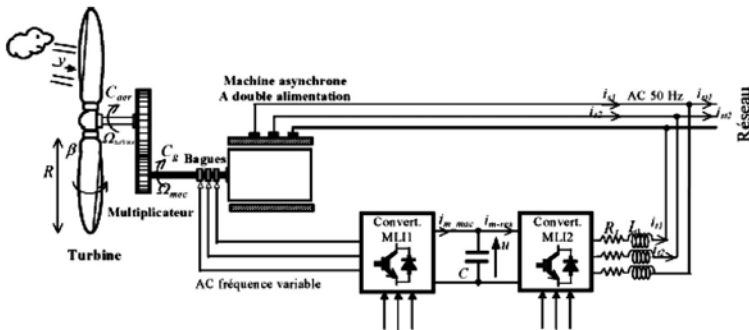


Fig. 5: Machine asynchrone à double alimentation

- Possibilité de régler la tension au point de connexion où elle est injectée (flicker très réduit) [4]
- La machine asynchrone doublement alimentée rassemble les avantages des machines asynchrones et synchrones.
- Robuste et permet le contrôle de l'énergie réactive.
- Chère par rapport à la machine asynchrone, mais elle est moins chère par rapport à la machine synchrone.
- Un coût de kilowattheure nettement meilleur que celui des machines synchrones sous un même régime du vent [4].

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le présent travail permet:

- D'étudier et traiter les données relatives au vent moyennant un outil informatique (le logiciel Alwin) qui a servi pour atteindre l'objectif final: Evaluer le potentiel du gisement du site étudié, Prédire l'énergie éolienne du parc en question, en se basant sur un choix judicieux de la machine, Déterminer la direction des éoliennes, Analyser la turbulence (modèle journalier/courbe de calme) du vent dans le site en vue de prévoir la vitesse du démarrage de l'aérogénérateur et la mise en place des batteries en cas d'un système isolé,
- Les valeurs des paramètres mesurées sont très proches des valeurs issues de l'approximation par la modélisation mathématique de distribution de Weibull, ce qui valide notre étude.

- Déterminer l'implantation des éoliennes dans le site,
- L'insertion de ce parc va protéger l'environnement de notre pays annuellement contre 415 200 tonnes du gaz carbonique CO₂.

Et la production éolienne permet de renforcer la capacité électrique installée par une production annuelle d'énergie de 516 GWh.

Et Enfin les simulations dégagées permettent de confirmer la prédiction de la production de l'énergie éolienne réellement sur le site.

Les perspectives de ce travail visent la modélisation d'une chaîne de conversion d'aérogénérateurs et d'établir une stratégie de commande globale pour mieux optimiser le rendement du système.

NOMENCLATURE

V	Vitesse moyenne du vent, m/s	E	Energie produite, kWh
ρ	Densité de l'air, kg/m ³	T _h	Période de temps, h
L	Dimension du terrain parallèlement à la direction prédominante du vent	I	Dimension du terrain perpendiculaire à la direction prédominante du vent
P _i (V)	Puissance donnée par aérogénérateur à la vitesse V _i	N	Nombre total d'aérogénérateurs à placer sur site
D	Diamètre du rotor de la machine	H	Hauteur du pylône
N1	Nombre d'aérogénérateurs par rangée	N2	Nombre de rangée d'aérogénérateurs
P(V)	Densité de probabilité de la vitesse V	C	Facteur d'échelle de la courbe, m/s
K	Facteur de forme de la courbe		

REFERENCES

- [1] C.D.E.R, '*L'Energie Eolienne au Maroc: Gisement et Dimensionnement*', Edition 2002.
- [2] H. Mabchour, '*Etude, Modélisation et Expérimentation des Composantes d'un Système Hybride Couplant les Energies Solaire et Eolienne – Performances et Méthodologie de Dimensionnement*', Thèse de Doctorat, Université Hassan II Mohammedia, 1999.
- [3] C.D.E.R, '*Les Ressources Eoliennes du Maroc*', Edition 2007.
- [4] S. El Aïmani, '*Modélisation de Différentes Technologies d'Eolienne Intégrées dans un Réseau Electrique de Moyenne Tension*', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale, Université de Lille, France, 2004.
- [5] Document, '*Logiciel Alwin pour le Traitement des Données Relatives au Vent*'.
- [6] L. Khettache, '*Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée*', Thèse de Doctorat, Université de Batna, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Algérie, 2007.
- [7] Limites Normatives CEI 61400-21, 2001; CEI 61000-3-7, 1996; CEI 61000-3-6, 1996.
- [8] F. Poitiers, '*Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne*', Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2003.