

Influence des paramètres météorologiques sur la production d'un aérogénérateur: Application sur le littoral Sahélien

S.M. El Moustapha ¹, M.L. Ndiaye ^{1*}
P.A. Ndiaye ¹, A.K.O. Mahmoud ² et I. Youm ³

¹ Centre International de Formation et de Recherche en Energie Solaire, CIFRES
Université Cheikh Anta Diop, B.P. 5085, Dakar, Fann, Sénégal

² Centre de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables, CRAER
Université de Nouakchott, Mauritanie

³ Centre d'Étude et de Recherches sur les Energies Renouvelables (CERER), FST
Université Cheikh Anta Diop, B.P. 5085, Dakar, Fann, Sénégal,

(reçu le 31 Décembre 2013 – accepté 29 Mars 2014)

Résumé - Ce travail s'intéresse principalement à étudier l'influence des paramètres météorologiques (vent, température, pression, humidité) sur la production des générateurs éoliens de petites puissances. Le but de ce travail est d'élaborer des modèles qui traduisent l'influence des différents paramètres météorologiques sur la production d'un système éolien dans un site de rugosité donnée. L'étude du fonctionnement de la turbine éolienne en fonction des paramètres météorologiques est complexe et la modélisation des phénomènes physiques liés aux paramètres météorologiques est nécessaire. L'influence des paramètres météorologiques revêt des formes très diverses pour chaque chaîne de conversion et pour chaque site. Cette recherche d'influence des paramètres, comme la température, la pression et l'humidité, a pour but ultime la définition de modèles physiques préalablement validés avec des observations sur le terrain et permettant ainsi de prévoir la production d'un parc éolien.

Abstract - The setting up of a wind system requires, beforehand, an evaluation of the potential of the site. These estimates were often based on the wind characteristics: speed, direction and intensity. Yet the optimal exploitation of the wind energy requires the knowledge of other meteorological parameters as the relative humidity, the ambient temperature, the air pressure and the topographic nature of the site. This paper presents a model of simulation that links the power of a wind to the meteorological parameters (pressure, temperature and humidity) and to the roughness of the site that explains the effect of the obstacles on the wind performance.

Mots clés: Aérogénérateurs - Modélisation de systèmes électriques – Rugosité - Paramètres météorologiques.

1. INTRODUCTION

Dans les régions rurales isolées, hors de portée du réseau électrique, l'exploitation de l'énergie éolienne est une perspective attrayante pour la fourniture de l'électricité dont les populations ont besoin pour améliorer leur niveau de vie. L'intégration de l'énergie éolienne dans les systèmes de production électrique est de plus en plus envisagée, face à la rareté et à l'augmentation du coût des sources des énergies fossiles et de leurs émissions des gaz à effet de serre.

* mamadouamine.ndiaye@ucad.edu.sn

L'exploitation de l'énergie éolienne pour être économiquement viable nécessite les connaissances de paramètres météorologiques, tels que la vitesse du vent, l'humidité relative, les températures de l'air ambiant, etc. La plupart des estimations du potentiel éolien d'un site donné, ne s'intéresse qu'aux caractéristiques du vent: vitesse, direction et intensité.

A côté des grandes centrales éoliennes et de parcs éoliens offshore, les éoliennes de faible puissance sont des variantes plus adaptées aux besoins de développement des pays sahéliens. Parmi les exemples potentiels d'applications nous pouvons citer: le dessalement de l'eau de mer, le froid, la congélation, l'arrosage goutte à goutte, l'éclairage public, etc.

Dans les sites urbains ou périurbains, même si le marché potentiel est très important, l'éolien se heurte à des obstacles qui limitent sa performance comme: la rugosité du terrain, la faiblesse du gisement éolien et l'influence des paramètres météorologiques. C'est pourquoi, la maîtrise de l'influence de ces paramètres peut s'avérer intéressante pour développer cette technologie. Pour prévoir la production des systèmes électriques hybrides, où sont mis en contribution des générateurs éoliens, il est nécessaire d'estimer la puissance disponible à tout moment. Quels sont les paramètres les plus influents sur la production ? Quel est le degré d'influence de ces paramètres ?

Ce travail s'intéresse aux éoliennes de petites puissances et principalement l'influence des paramètres météorologiques (vent, température, pression, humidité) sur leur production. Ainsi, nous chercherons à montrer l'influence des paramètres du site (rugosité du terrain, faiblesse du gisement éolien etc.) sur la production. Il s'agit d'une modélisation et d'une simulation numérique de la production en tenant compte de différents paramètres météorologiques (vitesse du vent, température, pression atmosphérique, rugosité du terrain, etc...).

Les données exploitées pour valider ce travail sont issues du littoral Sahélien, dans le cadre d'une évaluation du potentiel éolien. Les objectifs visés sont d'une part, de transposer les résultats issus de ce travail sur tous les sites semblables au site sahélien et d'autre part, simuler le comportement des éoliennes de grandes puissances sur les sites sahéliens.

La section 2 présente des travaux connexes s'inscrivant dans le même contexte. Différents modèles théoriques et expérimentaux pour caractériser un site et modéliser les paramètres météorologiques sont exposés dans la section 3. Les résultats des simulations de ces différents modèles sont présentés dans la quatrième partie. Enfin des résultats expérimentaux sur des données réelles valident les simulations à la section 5.

2. TRAVAUX CONNEXES

Les travaux de recherche sur les éoliennes de petites puissances (1 à 50 kW) pour des installations de proximités (habitations, bâtiments, sites isolés,..), sont en pleine croissance. La plupart des travaux de recherche ont été réalisés dans le contexte de l'étude dynamique et structurelle des éléments de la chaîne de conversion éolienne. Les travaux de Mirecki [1] portent sur la réalisation d'un banc d'essai dédié à une éolienne de petite puissance, dans le but de comparer les architectures et les stratégies de gestion de l'énergie produite.

Une étude d'un système hybride réel a été proposée par l'équipe du CRAER en collaboration avec le CERER pour l'approvisionnement en eau et l'irrigation goutte à

goutte pour les pays sahéliens du littoral [2]. Le travail de Ould Mohamed [3] porte sur la modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel).

La puissance produite a été étudiée en fonction de la vitesse du vent pour une masse volumique de l'air constante. La majorité des travaux effectués dans le même contexte, porte un grand intérêt au développement des sources de production de grandes puissances couplées au réseau [4-6]. Dans ces travaux, la vitesse du vent a été considérée comme le seul paramètre d'entrée du système éolien en négligeant la variation des autres paramètres météorologiques.

Les travaux de Gualtieri [7] et de Secci [8], s'inscrivent dans le contexte de l'étude de la variation de la puissance produite par une éolienne. Ils analysent l'effet des conditions atmosphériques sur les performances en mettant l'accent sur l'interaction entre le profil de la vitesse du vent et la puissance de l'éolienne.

La théorie de similitude, qui détermine le profil vertical du vent en fonction des conditions de stabilité de la couche limite atmosphérique, a été établie par Monin et Obukov [9]. Cette théorie a été complétée, par les travaux de Dyer [10] et Paulson [11] qui ont donné les expressions des fonctions implicites selon les différentes classes de rugosité. Elle représente la base de tous les travaux sur le profil du vent et l'extrapolation verticale de la vitesse du vent.

Le travail de Merzouk [12] montre que l'écoulement de l'air est régi par des perturbations d'origine mécanique qui influent sur le profil du vent. L'écoulement de l'air est aussi régi par des perturbations d'origine thermique, si les turbulences sont générées par la variation de la température ou l'échauffement et le refroidissement de la terre.

Le travail de Sambatra [13] a contribué à la modélisation comportementale d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite puissance où des modèles de dispositif éolien basés sur les modèles de connaissance des éléments de la chaîne ont été proposés et analysés par le biais des résultats de simulation qui ont été confrontés à des mesures expérimentales.

Le vent est causé par le déplacement de la masse d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres parties, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. C'est pourquoi, le vent est une grandeur stochastique, intermittente qui dépend d'un ensemble de facteurs tels que la situation géographique, l'altitude, la température ainsi que d'autres paramètres qui caractérisent la masse volumique de l'air et la hauteur de captage [14].

Cette dépendance pose la question sur la manière dont évolue la puissance produite par une éolienne en tenant compte de l'influence de tous les facteurs. Une réponse globale à cette question n'a pas été bien abordée dans la littérature. En effet la plupart des travaux de recherche mettent l'accent sur l'influence des paramètres tels que la vitesse du vent, la rugosité et l'altitude.

La grande majorité de ces travaux évoquent l'existence d'autres paramètres météorologiques comme la température qui influe aussi sur l'écoulement du vent mais négligent cette influence sans justification en prenant la masse volumique constante. La section suivante aborde des modèles théoriques et expérimentaux pour caractériser un site et modéliser les paramètres météorologiques.

3. MATERIELS ET METHODES

La méthodologie adoptée consiste d'une part, à modéliser les caractéristiques du site, à simuler leurs influences sur la production. D'autre part, des modèles des paramètres météorologiques sont élaborés, puis simulés sur Matlab pour mesurer leurs influences sur la production.

La démarche méthodologique est complétée par une validation expérimentale des modèles proposés à travers l'analyse des données mesurées sur site réel: celui du CRAER et de l'ASECNA (Agence de la Sécurité de Navigation en Afrique et à Madagascar) de Nouakchott.

3.1 Modélisation des caractéristiques du site

Le choix d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie avec des générateurs éoliens. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien.

Pour connaître les propriétés du site de production, des mesures de la vitesse du vent sur une grande période du temps sont nécessaires (un an au moins). En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur à laquelle les mesures sont prises. A une même hauteur h , la vitesse moyenne du vent varie suivant la nature du terrain. En général, le site de référence est situé sur un terrain plat ou légèrement ondulé, de rugosité z_0 .

La figure 1 montre l'influence d'un changement de la rugosité de z_0 à z_1 sur l'écoulement de l'air. La vitesse du vent est circonscrite à l'intérieur d'une couche appelée 'couche limite interne' pour laquelle la perturbation est maximale près du sol et négligeable au sommet de la couche.

La hauteur δ de la couche limite dépend de la distance x par rapport à la discontinuité. Une augmentation ou une diminution de la rugosité provoque respectivement une décroissance ou une croissance de la vitesse moyenne du vent dans la 'couche limite interne'.

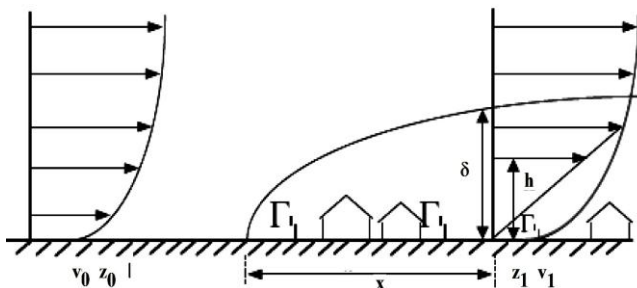


Fig. 1: Influence d'un changement de rugosité sur l'écoulement de l'air

La vitesse moyenne $V_1(x, h)$ du vent à la hauteur h non nulle et inférieure à la hauteur de la "couche limite interne" peut être modélisée par l'équation (1). Cette dernière se réfère à la vitesse standard v_0 , mesurée à 10 m pour un terrain de catégorie III (**Tableau 1**). Le paramètre a , relatif à la rugosité du vent z_1 , est donné par le **Tableau 1** [15]; et $\delta(x)$ est la hauteur de la 'couche limite interne' est donnée par la formule expérimentale de l'équation (2).

$$\frac{V_1(x, h)}{V_0} = a \times \left(\ln(\delta(x)/z_0) / \ln(\delta(x)/z_1) \right) \times \ln(h/z_1) \quad (1)$$

$$\delta(x) = 0.35 \times (x^{0.8}) \times z_g \quad (2)$$

x et z_g en mètres, où z_g est la plus grande des deux rugosités z_0 et z_1 . Les valeurs estimées de z_0 et a sont regroupées dans le **Tableau 1**. Si $x > 500$ m, la formule (1) est simplifiée par l'équation (3).

$$\frac{V_1}{V_0} = a \times \ln(h) \quad (3)$$

Le modèle de la puissance produite par un générateur éolien est donné par l'expression (4).

$$P_e = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3 \times C_p(\lambda, \beta) \quad (4)$$

Où ρ (kg/m³) est la masse volumique de l'air, s (m²), la surface balayée par les pales, v (m/s), la vitesse du vent, C_p , le coefficient de puissance de l'éolienne, λ , la vitesse spécifique et β , l'angle de calage.

Tableau 1: Caractéristiques z_0 et a de la loi de variation verticale du vent

Catégorie	Nature du terrain	z_0	a
I	Grande étendue d'eau (océan, mer, lac)	0.005	0.166
II	Prairies plates à herbes rases sans arbres ni construction	0.02	0.182
III	Base campagne plate ou légèrement ondulée avec des obstacles épars (maisons, arbres, haies), cultures basses	0.07	0.202
IV	Campagne avec cultures élevées (mil, maïs, petits arbres fruitier), habitat dispersé	0.25	0.229
V	Bocage dense, vergers, petits bois, banlieue pavillonnaire	0.40	0.240
VI	Zone urbaine, bois et forêts	1	0.266

3.2 Modèles des paramètres météorologiques du site

La masse volumique de l'air ρ est égale à 1,225 kg/m³ à 15 °C au niveau de la mer où l'air est assez dense. La masse volumique est en général donnée par la formule (5).

$$\rho(h) = \frac{P(h) \times M}{R \times \vartheta(h)} \quad (5)$$

Où $\rho(h)$, est la masse volumique de l'air sec à l'altitude h (en kg/m³), P , la pression atmosphérique à l'altitude h (hPa), M , la masse molaire de l'air sec ($M=28,9644$ kg/kmol), ($R=287,06$ J/kg.K), la constante des gaz parfaits et ϑ , la température à l'altitude h (K).

La formule simplifiée de la masse volumique de l'air sec est donnée ci-après:

$$\rho = \frac{P}{287.06 \times (273.15 + T)} \quad (6)$$

La puissance de la turbine dans les conditions de l'air sec est donc donnée par l'équation (7).

$$P_m = \frac{1}{2} \times \frac{1}{287.06 \times (T + 273.15)} \times S \times V^3 \times C_p(\lambda, \beta) \quad (7)$$

Nous retenons de cette dernière expression, que la puissance récupérée par la turbine varie avec la pression atmosphérique et avec la température ambiante de l'air. Pour déterminer la valeur exacte de la masse volumique de l'air, il faut prendre en compte l'humidité de l'air, car elle modifie la constante spécifique de l'air R_h {éq.(9)}. La masse volumique de l'air humide est donnée alors par la formule (8).

$$\rho = \frac{P}{R_h \times \vartheta} \quad (8)$$

$$R_h = \frac{R_s}{1 - \left(H_r \times \frac{P_{Sat}}{P} \right) \times \left(1 - \frac{R_s}{R_v} \right)} \quad (9)$$

Où $R_s = 287,06$ J/kg.K, est la constante spécifique de l'air sec, $R_v = 461$ J/kg.K, la constante spécifique de la vapeur d'eau, H_r , l'humidité relative (%) et P , la pression de l'air en (Pa). P_{Sat} , se détermine avec la formule de Magnus qui est donnée par la formule (10).

$$P_{Sat} = 6110.213 \times \exp\left(\frac{17.5043 \times T}{241.2 \times T}\right) \quad (10)$$

Où T , est la température en °C, ($\vartheta + 273.15$ en K). Cette formule est valable pour T entre -30°C et $+70^\circ\text{C}$ et donne la pression en Pa.

Donc le modèle de la masse volumique de l'air est donné par l'équation (11) et celui de la puissance produite par la formule (12).

$$\rho(H_r, T, P) = \frac{1}{287.06 \times (T + 273.15)} \times \left(P - 230.617 \times H_r \times \exp\left(\frac{17.5043 \times T}{241.2 + T}\right) \right) \quad (11)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \times \frac{1}{287.06 \times (T + 273.15)} \times \left(P - 230.617 \times H_r \times \exp\left(\frac{17.5043 \times T}{241.2 + T}\right) \right) \times S \times V^3 \times C_p(\lambda, \beta) \quad (12)$$

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Influences des caractéristiques du site sur la production

Le site de référence choisi est celui de l'ASECNA, il est situé à l'Est de Nouakchott et à 1 km de distance du site de CRAER. Une simulation de l'équation 3 sous Matlab donne la figure 2, où sont tracées les variations de la vitesse du vent de quelques sites (aux distances supérieures à 500 m du site de référence) de rugosité différente de celle du site de référence qui est de 0.07 m.

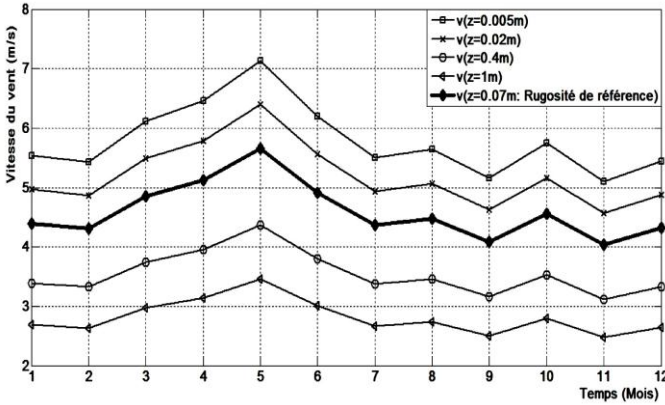


Fig. 2. Variation de la vitesse du vent pour plusieurs sites de rugosités différentes

La figure 2 montre une augmentation de la vitesse du vent, à la même hauteur, si on se déplace du site de référence vers un site de rugosité inférieure.

En revanche, la vitesse moyenne diminue, si les mesures sont prises sur un site de rugosité supérieure à celle du site de référence. Les taux de variation des vitesses moyennes du vent, δ_v , mesurées sur des sites de rugosités différentes, sont donnés sur le **Tableau 2**.

La vitesse moyenne du vent sur le site de référence est de 4.59 m/s. Les mesures du vent sur un autre site de rugosité 0.02 m montrent une augmentation de la vitesse du vent d'environ 13 %, tandis que, les mesures sur un autre site de rugosité 0.005 m produisent une augmentation de 26 %.

Le déplacement vers des sites de rugosité respectivement 0.4m et 1 m, diminue la vitesse du vent de 23 % et 39 % respectivement.

Tableau 2: Taux de variation de la vitesse suivant la variation de la rugosité

Sites	S (z=0.005m)	S (z=0.02 m)	S (z=0.4 m)	S (z=1m)
V_{moy} (m/s)	5.79	5.19	3.54	2.81
δ_v (%)	26.17	13.1	-22.74	-38.75

Une simulation des influences des caractéristiques du site sur la production a été effectuée sur une éolienne de 3 kW installée au CRAER dont les caractéristiques sont:

diamètre 4 m donc, surface $S = 12.56 \text{ m}^2$, angle de calage $\beta = 2$ et hauteur de référence $h = 10 \text{ m}$.

La figure 3 montre une augmentation de la puissance avec une diminution de la rugosité. La courbe du site de référence montre que la puissance maximale est de 297 W. Le **Tableau 3** présente les variations de la puissance maximale en fonction de la rugosité du site.

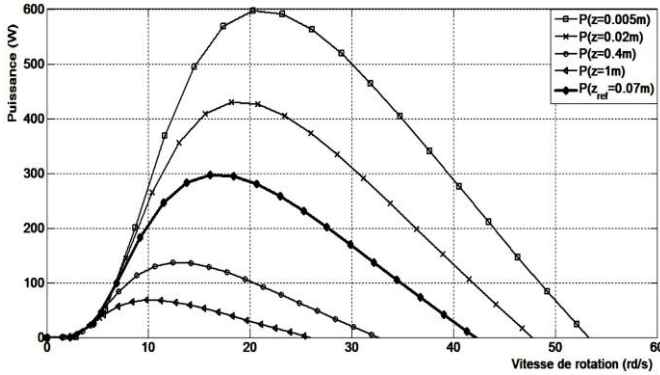


Fig. 3: Puissance en fonction de la vitesse pour des sites de différentes rugosités

Tableau 3: Taux de variation de la production en fonction de la pression

Sites	S (z=0.005m)	S (z=0.02 m)	S (z=0.4 m)	S (z=1m)
P_{max} (W)	596.81	429.91	136.98	68.267
δ_p (%)	100.87	44.691	-0.53	-0.77

4.2 Influences des paramètres météorologiques du site sur la production

Les données météorologiques de Nouakchott mettent en évidence une faible variation de la pression dans l'intervalle se situant entre 1000 mbar et 1020 mbar. Une simulation numérique de la puissance mécanique d'une turbine a été faite à partir de l'équation 12.

Elle s'est effectuée dans les conditions de température 27°C et d'humidité 66%, pour 03 valeurs de vitesse du vent et 03 valeurs de pression différentes.

La simulation montre que l'influence de la pression sur la puissance produite est limitée au maximum à 2% (**Tableau 4**) et par conséquent négligeable.

Tableau 4: Taux de variation de la production en fonction de la pression

	V = 5 m/s			V = 8 m/s			V = 12 m/s		
P (hPa)	1000	1010	1020	1000	1010	1020	1000	1010	1020
P_{max} (W)	362.12	365.77	369.43	1483.2	1498.2	1513.2	5006	5056.5	5107
δ_p (%)	0	01	02.01	0	01.01	02.02	0	01	02.01

Le **Tableau 5** présente les résultats de simulation du modèle de la puissance en fonction de l'humidité aux conditions de température de 27°C et de pression de 1013 mbar pour des valeurs de vitesse du vent différentes.

Il montre une influence négative limitée de l'humidité sur la production. Une augmentation de 10 à 90% de l'humidité n'induit qu'une diminution de 1% de la puissance quelque soit la vitesse du vent (**Tableau 5**). Cet impact peut être considéré comme négligeable.

Tableau 5: Taux de variation de la puissance en fonction de l'humidité relative

	V = 5 m/s			V = 8 m/s			V = 12 m/s		
H (%)	10	50	90	10	50	90	10	50	90
P_{\max} (W)	369.62	367.66	365.69	1514	1505.9	1497.9	5109.6	5083.5	5055.3
δ_P (%)	0	-0.53	-01.06	0	-0.53	-1.06	0	-0.53	-1.06

La figure 4 expose les résultats de simulation de la puissance mécanique à différentes températures pour trois vitesses données. Elle montre que plus l'air est frais, plus il est dense et plus la puissance produite par les aérogénérateurs augmente.

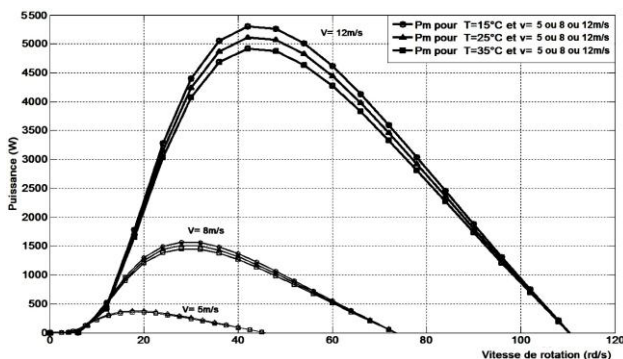


Fig. 4: Puissance produite à différentes températures pour différentes vitesses

La figure 4 montre que la puissance diminue avec une augmentation de la température. Le **Tableau 6** donne les variations relatives de la puissance maximale à différentes températures.

Il montre que le taux de diminution de la puissance δP est le même, quelque soit la vitesse du vent choisie. Cette diminution va jusqu'à 7 % si la température augmente de 15 à 35°C, ce qui donne une variation non négligeable dans un intervalle de 20°C.

Tableau 6: Taux de variation de la production en fonction de la température

	V = 5 m/s			V = 8 m/s			V = 12 m/s		
T (°C)	15	25	35	15	25	35	15	25	35
P_{\max} (W)	383.91	369.69	355.52	1572.5	1514.3	1456.2	5307.1	5110.7	4914.7
δ_P (%)	0	-3.70	-07.39	0	-3.70	-07.39	0	-3.70	-7.39

4.3 Validation expérimentale des résultats de simulation

Les résultats de la simulation ont montré que la rugosité et la température sont les paramètres les plus influents sur la production des aérogénérateurs. Par contre, la pression et l'humidité influencent très peu la puissance produite par conséquent sont négligeables sur la production du système éolien.

Pour valider les résultats, nous avons utilisé les données de deux sites : le CRAER (un site installé à l'université de Nouakchott/Mauritanie) et l'ASECNA (Agence de la Sécurité de Navigation en Afrique et à Madagascar).

Le site de l'ASECNA se trouve à l'aéroport de Nouakchott et à environ 1 km du CRAER dans une zone dégagée de rugosité 0.07 (**Tableau 1**). Sur ce site, il se produit des vitesses moyennes du vent entre 4 et 6 m/s tout au long de l'année à la hauteur de 10 m.

La figure 5 montre la variation de la vitesse v mesurée au cours de l'année 2004 sur ces deux sites de différentes rugosités.

La figure précédente montre que la rugosité est déterminante pour le choix des sites de production d'électricité par des aérogénérateurs, car la différence de vitesse induite par la rugosité est importante.

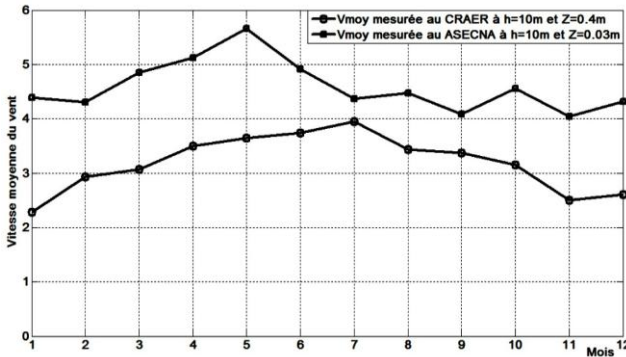


Fig. 5: Vitesse du vent pour deux sites de différentes rugosités

La figure 6 montre l'impact de la température sur la production des éoliennes. Elle permet de constater que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance de l'aérogénérateur.

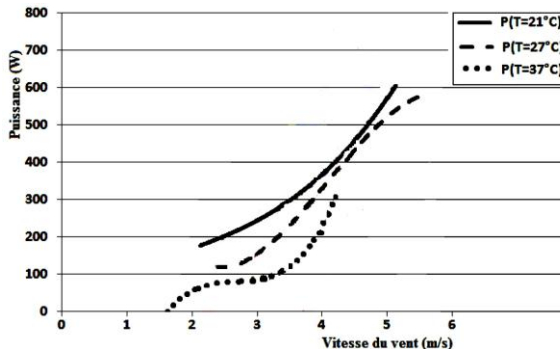


Fig. 6: Production de l'éolienne (3 kW, diamètre 2 m) installée au CRAER pour trois températures différentes

5. CONCLUSION

Nous avons présenté sur ce papier une contribution à la modélisation comportementale d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne en fonction des paramètres météorologiques, pour des sites isolés. Nous avons cherché à déterminer des modèles mathématiques et expérimentaux qui régissent au mieux les transferts énergétiques. Ces modèles proposés nous ont permis de voir l'évolution de la production en fonction d'une part de la rugosité, et d'autre part de la masse volumique de l'air qui varie avec les paramètres météorologiques de l'atmosphère. Nous avons ensuite étendu notre analyse par l'étude des impacts de la température, de la pression et de l'humidité sur l'évolution de la production.

Les résultats ont montré que le choix d'un site est un élément important pour le choix de l'option éolienne pour la production d'électricité et que la rugosité, l'altitude et la température influent plus que la pression et l'humidité. La puissance produite par l'aérogénérateur augmente, si la température diminue. La puissance augmente faiblement avec l'augmentation de la pression. L'influence de l'humidité est négligeable sur la production. La puissance varie remarquablement face à la topographie du site d'implantation ainsi qu'à l'élévation du moyeu de l'éolienne.

Enfin nous avons validé les modèles proposés à partir de résultats expérimentaux sur la variation de la vitesse du vent et de la puissance des aérogénérateurs installés sur les sites du CRAER et de l'ASECNA. Les modèles simplifiés, que nous avons élaborés, permettent d'obtenir de bonnes caractéristiques météorologiques du site. Les applications retenues pour la validation de ce travail, nous ont montré que la rugosité du site est un facteur important pour la conversion de l'énergie éolienne. De même, le choix d'un site dégagé permet d'obtenir de bonnes caractéristiques. Il est nécessaire d'élever la hauteur pour compenser les effets néfastes de la rugosité lorsque le site est de rugosité élevée.

Les perspectives de ce travail portent sur une étude de l'intégration des modèles proposés dans un système hybride. Il serait intéressant aussi de comparer les configurations proposées à d'autres types de chaînes de conversion en termes de performance énergétique et coût. De plus, certaines analyses comme celle des variations journalières ou l'étude des roses de vent, n'ont pas été approfondies. Cette dernière devrait d'ailleurs faire l'objet d'une étude poussée et réalisée en parallèle avec l'étude des variations des paramètres afin de déterminer l'influence des changements de directions du vent.

REMERCIEMENTS

Nous remercions P.A. Ndiaye, responsable du Centre International de Formation et de Recherche en Energie Solaire. Un grand merci à tous les membres du laboratoire pour leurs collaborations actives pour le rayonnement de la recherche au sein de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar.

REFERENCE

- [1] A. Mirecki, '*Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à Une Eolienne de Petite Puissance*', Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2005.
- [2] Y.A. Ould Mohamed, A. Ould Mahmoud et I. Youm, '*Modélisation d'un Système de Stockage Intégré dans un Système Hybride (PV/Eolien/Diesel)*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°2, pp. 205 – 214, 2007.

- [3] A. Ould Mahmoud, '*Caractérisation, la Modélisation, le Fonctionnement et les Impacts d'un Système Hybride pour l'Alimentation de Charges Mixtes*', Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2009.
- [4] L. Leclercq, '*Apport du Stockage Inertiel Associé à des Eoliennes dans un Réseau Electrique en Vue d'Assurer des Services Systèmes*', Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2004.
- [5] V. Rogez, '*Modélisation Simplifiée de Sources de Production Décentralisée pour des Etudes de Dynamique des Réseaux. Application à l'Intégration d'une Production Eolienne dans un Réseau de Distribution Insulaire*'. Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2006.
- [6] A. Davigny, '*Participation aux Services Système de Fermes d'Eoliennes à Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d'Energie*', Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2007.
- [7] G. Gualtieri and S. Secci, '*Comparing Methods to Calculate Atmospheric Stability-Dependent Wind Speed Profiles: A Case Study on Coastal Location*', *Renewable Energy*, Vol. 36, N°8, pp. 2189 - 2204, 2007.
- [8] G. Gualtieri and S. Secci, '*Wind Shear Coefficients, Roughness Length and Energy Yield Over Coastal Locations in Southern Italy*', *Renewable Energy*, Vol. 36, N°3, pp. 1081-1094, 2011.
- [9] A.S. Monin and A.M. Obukov, '*Basic Regularity in Turbulent Mixing Surfaces Layer of the Atmospheric*', *Akad. Nauk/S.S.S.R. Trudy Geophys. Inst.*, Vol. 24, pp. 151, 1954.
- [10] A.J. Dyer, '*A Review of Flux Profile Relationships*', *International Journal of Boundary Layer Meteorology*, Vol. 7, N°3, pp. 363 - 372, 1974.
- [11] C.A. Paulson, '*The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer*', *International Journal of Applied Meteorology*, Vol. 9, N°6, pp. 857 - 861, 1970.
- [12] N.K. Merzouk, '*Evaluation du Gisement Energétique Eolien, Contribution à la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie*', Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [13] E.J.R. Sambatra, '*Contribution à la Modélisation Comportementale d'une Chaîne de Conversion de l'Energie à une Source Eolienne et à Charge Variable*', Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [14] D.H. Tran, '*Conception Optimale Intégrée d'une Chaîne Eolienne «Passive»: Analyse de Robustesse, Validation Expérimentale*'. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [15] P.A. Ndiaye, '*Contribution à l'Etude et à la Réalisation d'un Simulateur Electrotechnique de Turbine d'Eolienne. Simulation des Paramètres d'une Eolienne Adaptée sur le Site du Havre*', Thèse de Doctorat, Université du Havre, 1998.