

# Etude et simulation des performances mécaniques d'une éolienne à axe horizontal de 2MW

F. Meziane et A. Khellaf

**Résumé :** Le présent travail consiste en l'étude et simulation des performances mécaniques d'une éolienne à axe horizontal, ainsi que l'influence de la variation de la vitesse du vent sur ses caractéristiques. Il s'agit de l'estimation de l'énergie éolienne disponible sur le site de Hassi R'mel et celui de Tindouf, suivi d'une simulation sous MATLAB des caractéristiques d'une éolienne de grande puissance 2MW de type siemens. L'exploitation des mesures de vitesses du vent prises sur les sites qui font l'objet de notre étude permis la détermination des performances de l'éolienne dans chacun de ces sites, ainsi que le tracé de l'évolution de la vitesse mensuelle et annuelle du vent, suivi d'une comparaison entre les deux lieux.

**Mots-clés:** éolienne, énergie éolienne, vent, performances mécaniques, axe horizontal.

## 1. INTRODUCTION

L'estimation de l'énergie éolienne disponible sur un site donné est sans doute l'étape la plus importante lorsqu'il s'agit d'envisager l'implantation d'un système d'exploitation de cette énergie. Sa dépendance directe du vent nécessite une connaissance approfondie des différents aspects intervenant dans l'évolution spatiale et temporelle du vent. Plusieurs travaux de recherche portant sur l'étude de gisement éolien et l'établissement de l'atlas éolien algérien sont menés, les premiers travaux en Algérie datent de 1984 dont on peut distinguer trois approches. La première est l'établissement des atlas et des cartes du vent de l'Algérie. Dans ce cadre on peut citer les travaux de Said et al. en 1984[1], suivis par Benssad, en 1985, [2], Hammouche, en 1990[3] et Kasbadji Merzouk en 2000 [4]. La deuxième est l'évaluation du potentiel éolien et le dimensionnement des systèmes de conversion de l'énergie éolienne dont des études techniques et technico-économiques ont été réalisées. Dans ce sujet, on peut citer les études de Himri et al sur l'évaluation du potentiel éolien dans les régions Sud et Sud-Ouest [5-11], les travaux de Koussa et al. pour la région d'Adrar [12] et les travaux de Helal et al. pour la région de Beni-Saf [13].

F. Meziane, Faculté des sciences de l'ingénieur, département énergétique, Université Boumerdes.

E-mail: W\_fares2002@yahoo.fr

A. Khellaf, CDER, Centre de Développement des Energies Renouvelables Bouzaréah-Alger.

La troisième approche est la modélisation de la vitesse du vent. Dans ce cadre, deux études ont été réalisées. Une modélisation de la vitesse du vent par des processus Markovien a été réalisé par Ettoumi et al.[14]. La deuxième a pris comme sujet la modélisation du profile vertical du vent en Algérie [15].

Le travail intitulé " Etude et simulation des performances mécaniques d'une éolienne à axe horizontal" a pour objectif l'étude de l'influence de la présence d'une turbine de vent sur l'air circulant autour d'elle, la capacité de cette dernière à capter l'énergie du vent, la cinétique de conversion de la puissance du vent en énergie mécanique au niveau du rotor puis en énergie électrique, introduisant le rendement mécanique qui est caractérisé par la manière dont les principaux indicateurs, de puissance, de couple, varient avec la vitesse du vent.

## 2. ETUDE STATISTIQUE DU VENT

Le traitement statistique des données tri-horaires de vitesse du vent permettent le calcul des paramètres suivant :

La vitesse moyenne :

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^N f_i V_i \quad (1)$$

Où  $f_i$  représente la fréquence d'occurrence des vitesses appartenant au  $i^{\text{ème}}$  intervalle de vitesse.  $N$  est le nombre d'intervalles de vitesses.

L'écart type :

$$\sigma = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

La moyenne du cube de la vitesse :

$$\bar{V^3} = \sum_{i=1}^N f_i V_i^3 \quad (3)$$

### 3. MODELISATION DE LA DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT

La fonction de distribution de Weibull fournit une représentation correcte et raisonnable de la distribution de la vitesse du vent. De plus, elle constitue un outil simple et facile à manipuler pour l'estimation de l'énergie produite par un système de conversion de l'énergie éolienne. En effet, grâce à la méthode développée par Justus et Mikhail (Justus et Mikhail, 1976), il devient possible d'ajuster les paramètres de Weibull obtenus à la hauteur d'intérêt et d'obtenir ainsi la distribution de la vitesse du vent à la hauteur désirée.

### 4. FONCTION DE DISTRIBUTION DES VITESSES DU VENT DE WEIBULL

L'histogramme de distribution des vitesses peut être "lissé" à l'aide de la fonction analytique de distribution de Weibull qui représente au mieux les valeurs expérimentales. Elle fournit une méthode empirique pour avoir une bonne représentation de la distribution du vent. Elle est donnée par (Justus et al., 1978):

(V) est la probabilité pour que le vent souffle à la vitesse V.

K est appelé le facteur de forme, sans dimension, il caractérise la dissymétrie de la distribution de fréquence.

C :est le facteur d'échelle (m/s).

### 5. LE MODELE DE PUISSANCE [16]

L'extrapolation de la vitesse de vent ainsi que des paramètres de la distribution de Weibull peut se faire au moyen du modèle de puissance suivant (Justus et Mikhail, 1976) :

$$\left(\frac{H_z}{H_0}\right)^n \quad (5)$$

n dépend de la vitesse de la hauteur de mesure.

$$n = a + b \ln V_0 \quad (6)$$

$$a = \frac{0.37}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{H_0}{10}\right)} \quad b = \frac{-0.088}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{H_0}{10}\right)} \quad (7)$$

a et b ont été obtenus par Justus et Mikhail (Justus et Mikhail, 1976) à partir d'un lissage par la méthode des moindres carrés de vitesses observées à plusieurs hauteurs au niveau de 4 tours météorologiques.

### 6. CARTE DES VENT

La carte du vent ci-dessous montre que les vitesses du vent élevées sont réparties dans le Sud, particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 3 m/s pour Béchar, et des vitesses supérieures à 4 m/s pour Tindouf et supérieures à 5 m/s pour Adrar. Concernant le Nord, les sites côtiers sont les moins ventés. On note aussi des vitesses supérieures à 4 pour ghardaia. On remarque globalement que l'Algérie est assez bien ventée puisque 78 % de sa surface est caractérisée par des vitesses supérieures à 3 m/s avec environ 40 % de ces vitesses supérieures à 5 m/s.

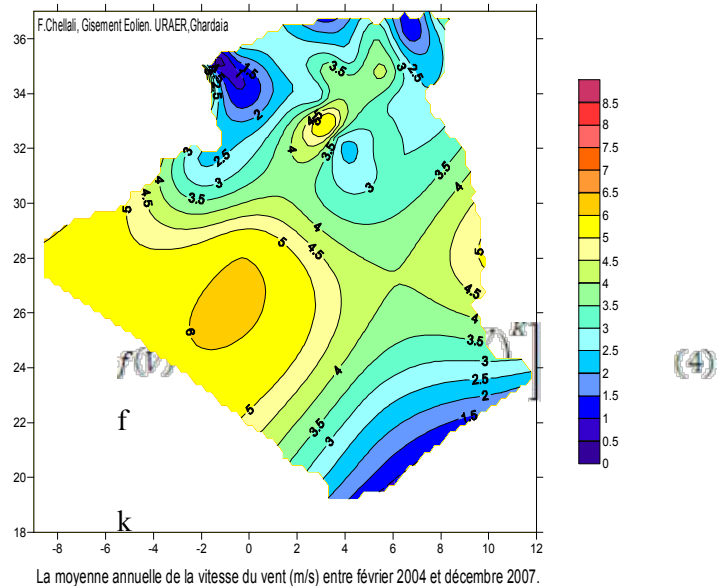


Fig 1: Carte des vent (Algérie)[17]

### 7. ETUDE DE CAS

Le calcul de la production énergétique annuelle d'une éolienne est relativement compliquée : cela nécessite une carte détaillée des lieux (jusqu'à plusieurs kilomètres dans la direction des vents dominants) et des statistiques météorologiques précises sur les vents pour une période minimum d'un an. Dans ce chapitre nous exploitons les données du vent mesurées sur un site donné pour calculer les performances d'une éolienne de 2MW

### 8. DONNEES UTILISEES

La présente étude est faite sur deux séries de données regroupant des mesures de vitesses du vent prises quotidiennement toute les trois heures sur le site de Hassi R'mel et celui de Tindouf respectivement à une hauteur de 10 m du sol, La période de mesure s'étalant du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2005. Le choix de ces deux sites s'appuie sur la répartition des vitesses du vent élevées représentées sur la carte des vents citée ci-dessus. En effet, on note des vitesses supérieur à 4m/s pour Tindouf et supérieur à 4.5 m/s pour Hassi R'mel (sites ventés).

### 9. SITE DE HASSI R'MEL

#### a). Variation annuelle de la vitesse du vent

Comme il est montré sur la figure précédente, la distribution des vitesses du vent n'est pas oblique, donc presque symétrique cela signifie que le vent est stable avec quelques fois des vents forts. En revanche, les vitesses de vent de 6,86 m/s sont les plus fréquentes. On dit alors que 6,86 m/s est la valeur modale de la distribution

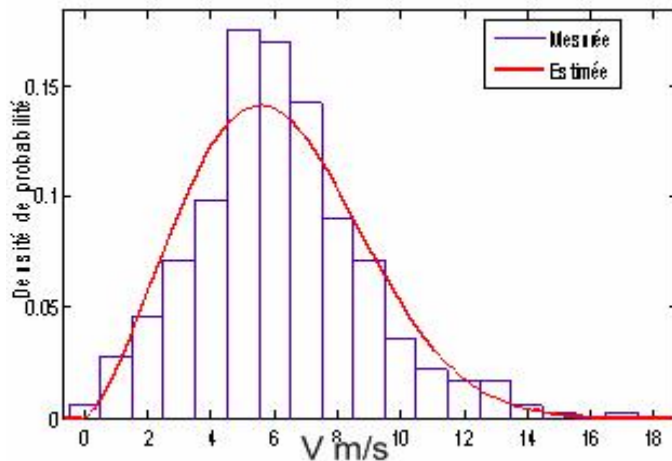


Fig.2 : Evolution annuelle de la vitesse du vent HASSI R'MEL(2005)

**b). Variation mensuelle**

Le tableau suivant illustre les valeurs des paramètres de Weibull c, k et la moyennes de vitesses du vent annuelle et mensuelle à une hauteur de 75 m calculés pour le site Hassi R'mel année 2005.

Mois	VITESSE MOYENNE (m/s) à H= 75 m	K	C
Janvier	4.78	1.54	5.31
Février	6.46	2.81	7.26
Mars	7.64	2.22	8.63
Avril	7.66	3.37	8.53
Mai	6.39	2.59	7.19
Juin	7.17	2.97	8.03
Juillet	6.13	2.69	6.90
Août	5.53	3.74	6.13
Septembre	6.37	3.18	7.12
Octobre	4.99	2.49	5.63
Novembre	5.31	1.97	5.99
Décembre	5.25	2.59	5.91
Année 2005	6.69	2.29	6.86

Tableau.1 : Paramètres De La Distribution De Weibull (Hassi R'mel 2005)

Il est intéressant de voir que le site objet d'étude obéit à une même variation mensuelle de la vitesse du vent. En effet, on remarque que la période de printemps et celle d'hiver sont caractérisées par des vents forts. La distribution statistique des vitesses du vent varie d'un endroit à l'autre vu qu'elle dépend des conditions climatiques locales, le paysage et sa surface. La distribution de Weibull tend donc à varier, tant en forme qu'en valeur moyenne. Le site

en question est bien venté, il est favorable pour l'implantation des capteurs éoliens

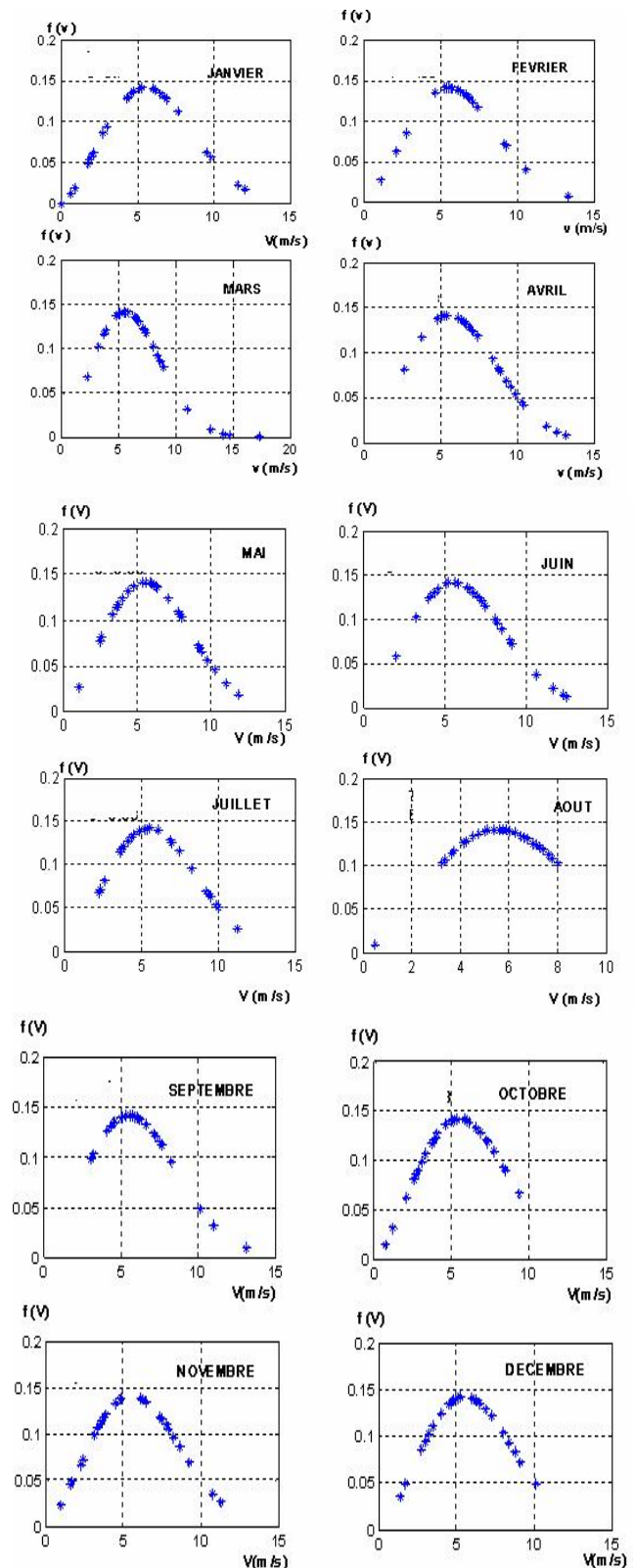


Fig.3. a.b.c: Variation mensuelle des vitesses du vent 2005 (HASSI R'MEL)

**10. SITE DE TINDOUF**

Le tableau suivant illustre les valeurs des paramètres de Weibull c, k et la vitesse moyenne mensuelle et annuelle calculées pour le site Tindouf à une hauteur de 75 m

Mois	VITESSE MOYENNE (m/s)	K	C
Janvier	4.09	1.03	4.15
Février	5.05	1.73	5.67
Mars	4.50	1.45	4.96
Avril	6.88	2.19	7.76
Mai	6.62	2.36	7.47
Juin	-	-	-
Juillet	5.49	1.49	6.08
Août	6.99	3.32	7.79
Septembre	7.57	2.72	8.51
Octobre	5.92	3.20	6.61
Novembre	5.32	1.79	5.99
Décembre	2.84	1.45	3.14
Année 2005	5.57	1.51	6.19

Tableau.2. Paramètres de la distribution de Weibull calculés pour le site de Tindouf 2005

a). Distribution annuelle de Weibull

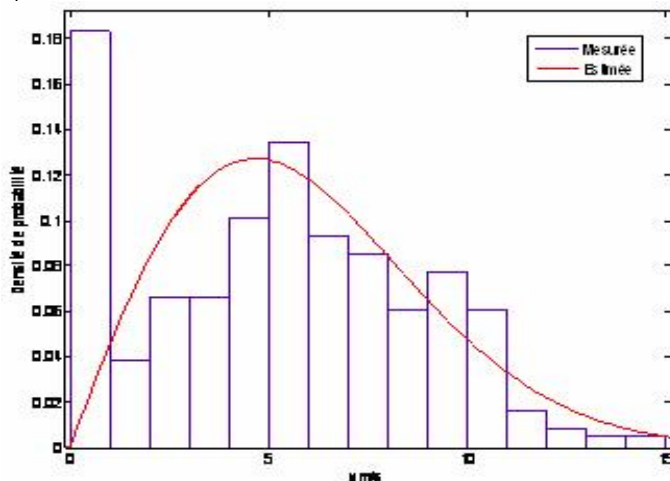


Fig.4. : Distribution annuelle de Weibull (Tindouf 2005)

b). Distribution mensuelle de Weibull

Nous voyons que le site objet de l'étude obéit à une même variation mensuelle de la vitesse du vent, on remarque que ce site est souvent venté ce qui est confirmé par l'inclinaison des courbes, les vitesses médianes varient entre environ 4 et 6 m/s. en effet, il faut choisir un type de capteur éolien qui s'adaptera à cette vitesse.

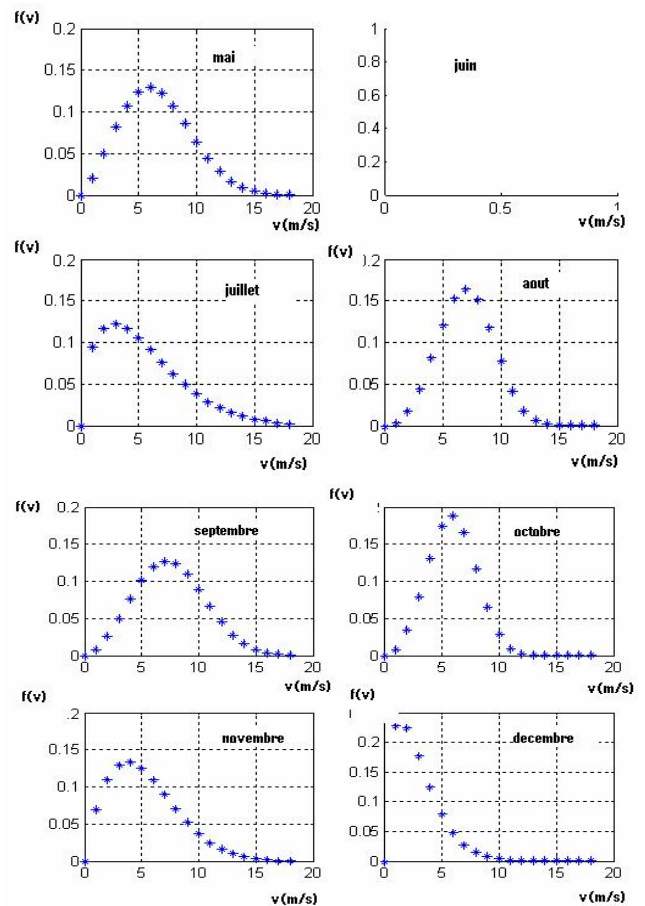
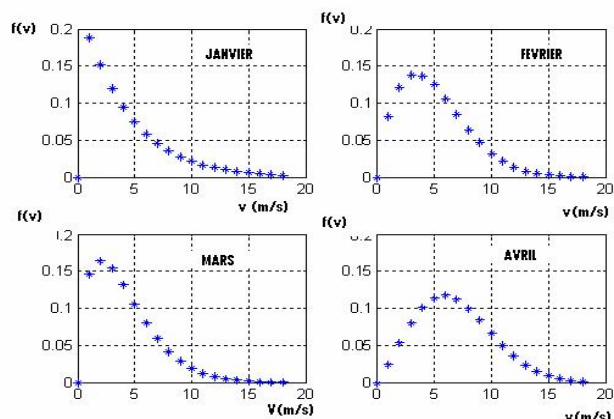


Fig.5.a.b.c : Distribution mensuelle de Weibull

## 11. MODELISATION ET SIMULATION DES PERFORMANCES D'UNE EOLIENNE DE 2 MW

Le tableau suivant regroupe les différentes caractéristiques d'une éolienne de 2 MW de type Siemens, cette éolienne est utilisée comme modèle dans les simulations du transys (Logiciel des énergies renouvelables), ces données sont inspirées du site de constructeur « Siemens ».

	Signification	Valeur	Unité
R	Rayon de la turbine.	38	m.
Cp	Coeff. d'exécution	0.45	-
CpR	Coeff. d'exécution évalué.	0.5	-
N	Vitesse de rotation.	18	tr/mn
PmR	Puissance mécanique évaluée.	$2 \cdot 10^6$	Watt
PtR	Puiss transmise évaluée.	$4.3 \cdot 10^5$	Watt
uC	Vitesse de démarrage.	6	m/s
uR	Vitesse évaluée.	15	m/s
uF	Vitesse d'arrêt.	25	m/s
L	Longueur d'axe de turbine.	0.8	m.
q.	Nombre d'étages (boite de vitesse).	3	-
segma	Densité de l'air.	1.225	Kg/m <sup>3</sup>
segmacier	Densité acier de l'axe.	7800	Kg/m <sup>3</sup>
etagR	Rendement évalué de générateur.	0.88	-
etamR	Rendement évalué de transmission.	0.93	-

Tableau.3: Caractéristiques d'une éolienne SIEMENS de 2 MW

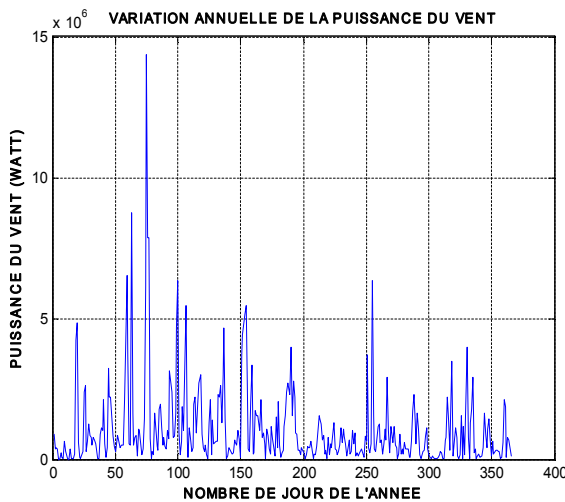
- Puissance du vent
- Puissance mécanique récupérée
- Couple mécanique
- Puissance électrique produite

$\Omega$  : vitesse de rotation de l'éolienne.  
 $C_p$  : coefficient de performance de rotor éolien.  
 $S$  : surface balayée par le rotor.  
 $V$  : vitesse du vent.  
 $\rho$  : densité de l'air.  
 $\eta_{mec}$ ,  $\eta_{gen}$  : rendement mécanique et de génératrice électrique.

## 12. SITE DE HASSI R'MEL

- 

### puissance du vent



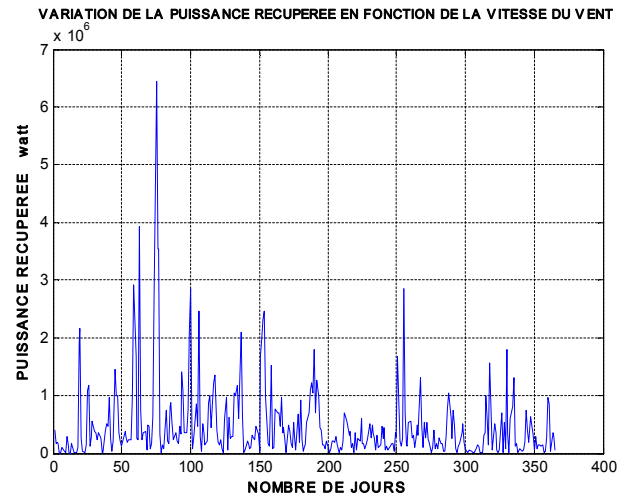
**Fig.6 : Variation de la puissance du vent**

La courbe ci-dessus montre la distribution de la puissance du vent sur le site de HASSI R'MEL, nous enregistrons une puissance moyenne ( $P_{moy} = 1.05$  MW) le maximum est atteint pendant le mois de mars ( $P_{max} = 14.3$  MW) ce qui donne une différence de 13.2 MW entre la puissance max et celle moyenne. Donc, il est intéressant de noter que ce graphique met en évidence l'instabilité et l'irrégularité de cette source d'énergie.

- 

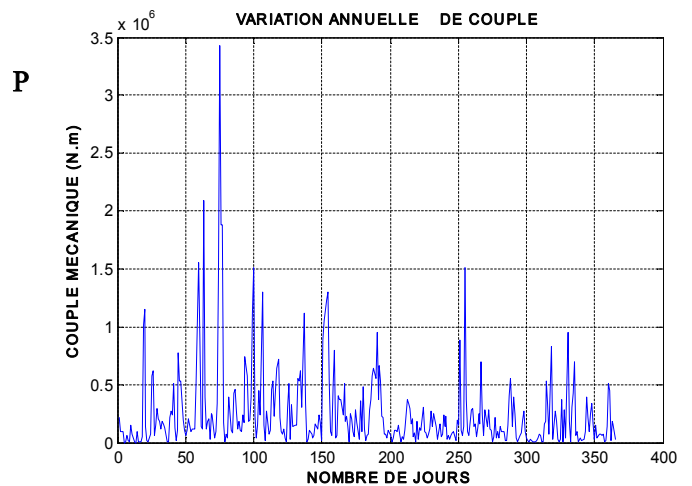
### puissance récupérée

La courbe ci-après montre que la puissance récupérée par la turbine représente que 45% de la puissance du vent, la diminution est due au coefficient de puissance qui est égal dans ce cas à 0.45.



**Fig.7 : Variation de la Puissance récupérée**

- Le couple mécanique



**Fig.8 : Variation de couple mécanique.**

Le couple mécanique produit par la turbine représente la moitié de l'énergie récupérée par cette dernière, ce coefficient de diminution  $1/\omega$  est égal environ 53 %, L'augmentation de couple fait augmenter l'effort de cisaillement qui à son tour fait tordre l'axe de la turbine, d'où une mauvaise transmission de la puissance vers la génératrice électrique.

- Puissance électrique produite

La puissance électrique est obtenue par le biais d'une génératrice, nous constatons alors que cette dernière est réduite de ( $\eta_g = 0.88$ ), ces pertes sont fonction de la tension de fonctionnement et de la fréquence. Si le générateur est du type synchrone ou d'induction, il est approprié de dire que les courants de Foucault, l'enroulement, et le frottement de roulement sont considérés des pertes.

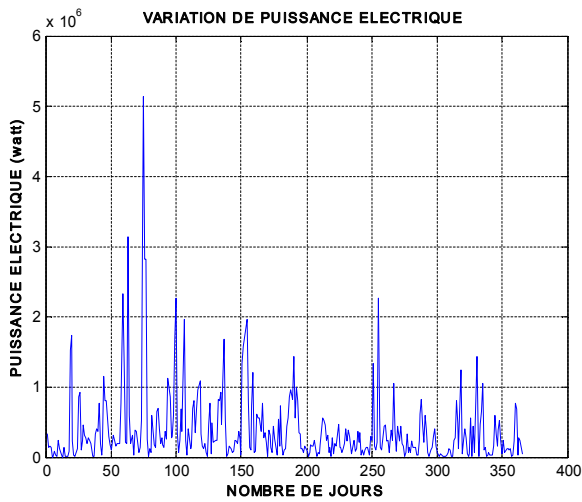


Fig.9 : Puissance électrique produite

### 13. SITE DE TINDOUF

- Puissance du vent

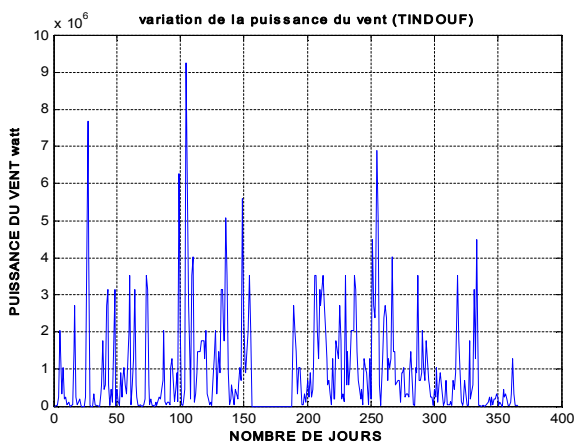


Fig.10 : Variation de la Puissance du vent la puissance moyenne ( $P_{moy} = 1.5\text{MW}$ ) le maximum est atteint pendant le mois d'avril ( $P_{max} = 9\text{MW}$ ) ce qui donne une différence de  $7.5\text{MW}$  entre la puissance max et celle moyenne. Donc, il est intéressant de noter que ce graphique met en évidence la forte instabilité et irrégularité de cette source d'énergie.

- Puissance récupérée

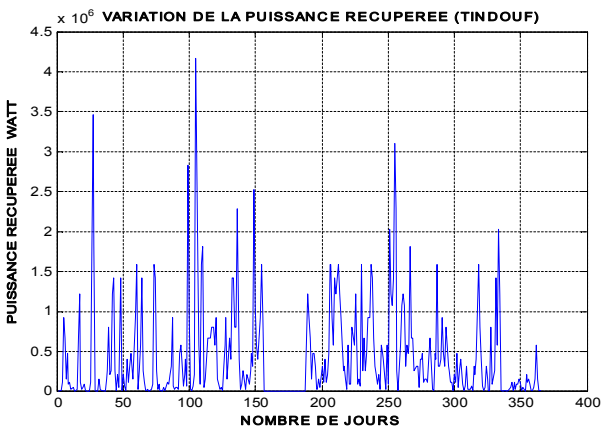


Fig.11 : Variation de la puissance récupérée.

La puissance récupérée par la turbine est environ 45% de la puissance du vent, cette diminution est provoquée par le cp.

- Le couple mécanique

Le couple mécanique produit par la turbine représente la moitié de l'énergie récupérée par cette dernière, ce coefficient de diminution  $1/\omega$  est égal environ 53 %, L'augmentation de couple fait augmenter l'effort de cisaillement qui à son tour fait tordre l'axe de la turbine, d'où une mauvaise transmission de la puissance vers la génératrice électrique

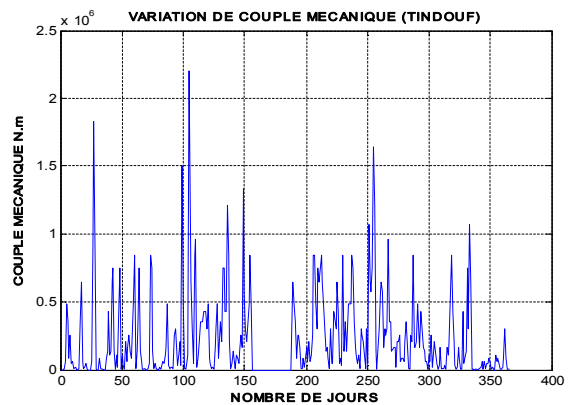


Fig.12 : Variation de Couple mécanique.

- Variation de la puissance électrique

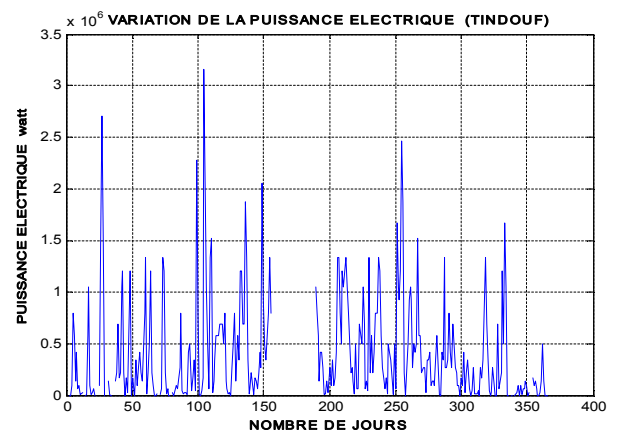


Fig.13 : La puissance électrique produite

La puissance électrique est réduite par rapport à celle transmise à cause des pertes (12%) au niveau de la génératrice la chose qui est due au fonctionnement et la fréquence.

### 14. COMPARAISON ENTRE LES DEUX SITES

La comparaison entre les résultats obtenus pour les deux sites vus précédemment nous permet de constater qu'ils sont favorables pour l'installation d'un parc éolien, le site de Hassi R'mel marque d'une part un avantage par rapport à celui de Tindouf par sa vitesse médiane qui vaut environ  $6.69\text{ m/s}$  (une vitesse supérieure à celle du démarrage de la plupart des turbines éoliennes). d'autre part, la présence du

vent de sable dans ce site durant le mois de mars et avril influe sur le rendement des éoliennes, ce qui rend la turbine peu fiable.

L'analyse des résultats obtenus confirme que les sites qui font l'objet de notre étude sont ventés durant toute l'année.

Le site de Hassi R'mel reste beaucoup plus favorable pour l'implantation des capteurs éoliens, car sa vitesse médiane vaut 6.69 m/s, un lieu favorable pour l'implantation de la plupart des capteurs éoliens.

## 15. CONCLUSION GENERALE

La présente étude nous a permis d'acquérir certaines connaissances sur l'énergie éolienne, sa captation, sa conversion en d'autres formes d'énergies, son utilisation, ainsi que les avantages et les inconvénients qu'elle présente. L'objectif de ce

travail a été l'étude des performances d'une éolienne à axe horizontal ainsi que l'influence de la variation de la vitesse du vent sur ses caractéristiques.

La première partie de ce travail est relative à l'estimation de l'énergie éolienne disponible sur un site donné, la dépendance directe de cette dernière du vent nous a poussé à présenter le phénomène du vent, et ses différentes caractéristiques, en suite nous avons introduit la statistique du vent.

Nous nous sommes en suite attachés à passer en revue la théorie générale des éoliennes, les notions élémentaires du fonctionnement des systèmes éoliens, leurs types, citant leurs avantages et leurs inconvénients. Dans la deuxième partie, nous avons fait une description sous forme d'équations mathématiques de la chaîne de La conversion de l'énergie du vent en puissance mécanique puis en puissance électrique. La troisième partie est consacrée à la simulation sous MATLAB des caractéristiques d'une éolienne de grande puissance 2MW de type siemens. L'exploitation des mesures de vitesses du vent prises sur le site de Hassi R'mel et Tindouf nous a permis la détermination des performances de l'éolienne dans chacun de ces sites, ainsi que le tracé de l'évolution de la vitesse mensuelle et annuelle du vent dans ces deux lieux.

## REFERENCES

- [1]:Said M et A. Ibrahim, « Energy in the Arab World. Energy », N° 9-3, pp. 217-38, 1984.
- [2]: Bensaid H., « The Algerian Programme on Wind Energy ». Proceeding of WEAC,pp. 21-27, Oxford, 1985.
- [3] :Hammouche R., « Atlas Vent de l'Algérie/ONM ». Office des Publications Universitaires (OPU), Alger 1990.
- [4]:N. kasbadji Merzouk. wind energy potential in Algeria. Renewable energy 21 (2000) 553-562.

[5]: Y. Himri, S. Himri, A. Boudghene Stambouli . Wind power resource in the south-western region of Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 554–556.

[6]:Y. Himria,A. Boudghene Stamboulib, B. Draouic, S. Himrid. Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria. Energy 33 (2008) 1128–1136.

[7]:Y. Himrib, S. Rehmana, B. Draouic, S. Himrid. Wind power potential assessment for three locations in Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 2495–2504.

[8]:Y. Himri , S. Himri, A. Boudghene Stambouli. Assessing the wind energy potential projects in Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2187–2191.

[9]:Y. Himri Arif S. Malik , A. Boudghene Stambouli , S. Himri , B. Draouie. Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1584–1591.

[10]:Y. Himri, A. Boudghene Stamboulib, B. Draouic. Prospects of wind farm development in Algeria. Desalination 239 (2009) 130–138.

[11]: Y. Himri , A. Boudghene Stambouli , B. Draoui , S. Himri d. Review of wind energy use in Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 910–914.

[12] :D. Saheb-Koussa , M. Haddadi et M. Belhamel. Economic and technical study of a hybrid system (wind–photovoltaic–diesel) for rural electrification in Algeria. Applied Energy 86 (2009) 1024–1030.

[13] :M. A. Tabet Helal et N. Ghellai. Le Gisement Eolien à Beni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien. Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003)143-146.

[14] :F. Youcef Ettoumi , H. Sauvageot et A.-E.-H. Adane. Statistical bivariate modelling of wind using first-order Markov chain and Weibull distribution. Renewable Energy 28 (2003) 1787–1802.

[15] : N. Kasbadji Merzouk. Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie. Thèse, L'université Abou bekr Belkaid Tlemcen. (2006)

[16]: Y.Braikia et Y. Cherfouh, “ Production d'hydrogène par électrolyse en utilisant l'énergie éolienne.” PFE, département mécanique Université Saad Dahlab Blida, 2006.

[17] : F.Chellali équipe éolienne Unité de Recherche Appliquées en Energies Renouvelables (URAER) Ghardaïa, Travail interne.