

Etude comparative entre les différentes méthodes extrapolations verticales de la vitesse du vent de la loi à coefficient de puissance avec le langage PYTHON

Hadji Merouane^{#1}, Benfekir Abderrahim^{*2}, Zoubida Lounis^{#3}

LABORATOIRE D'INGENIERIE EN SECURITE INDUSTRIELLE ET DEVELOPPEMENT DURABLE "LISIDD"
UNIVERSITE D'ORAN-2 MOHAMED BEN AHMED
BP 1524 ORAN, Algérie

¹hadji.j.marwan@gmail.com

³lounis_amira@yahoo.fr

LABORATOIRE D'INGENIERIE EN SECURITE INDUSTRIELLE ET DEVELOPPEMENT DURABLE "LISIDD"
UNIVERSITE D'ORAN-2 MOHAMED BEN AHMED
BP 1524 ORAN, Algérie

²benfekirrahim@yahoo.fr

Abstract—This paper concerns the study of danger about the installations of the sites of renewable energies, more exactly wind farms after we had shown the dangers which could alter a wind turbine and minimize the most commons accidents in the worldwide, we noticed that the high speed of the wind always returns as main or secondary cause in the incident.

It is in this context that a program with the PYTHON software was established to warn(prevent) the accidents for such wind turbine in such region, in the same time it will help us to compare between different methods so this allows us to view a feasibility and to choice the adequate territory or an adequate wind turbine in order to preserve the durability of the device by getting it a performance continues in complete safety .

Keywords— Wind turbine, Program, Wind, Danger, Risk.

I. INTRODUCTION

L'énergie éolienne a connu une avancée considérable ces dernières années de telle sorte que ce domaine est investi en force par plusieurs pays importants tels la Chine, l'Inde, les USA, le Brésil et les pays européens [1].

Cependant, une étude de risque est indispensable afin de déterminer le site adéquat pour la mise en place des parcs éoliens sur un territoire donné. Toutefois, le souci premier de tout client ou investisseur dans l'énergie renouvelable réside dans le choix de l'éolienne la plus sûre et la plus performante.

L'étude présentée dans ce travail expose les dangers que peut receler l'installation d'un parc éolienne en cas d'accident et permet aux clients de bien choisir le type d'éolienne adéquat pour la région d'installation du projet. Le contenu de cette étude est en relation avec l'importance des dangers de l'installation et des conséquences prévisibles en cas de sinistre. Le but recherché dans notre étude est la détermination et la

prévention. En effet, une phase de programmation est nécessaire afin de calculer les risques et garantir la sécurité du produit, cela en se basant sur les équations des deux chercheurs Betz et Mikhaïel qui ont établi la relation directe entre la puissance produite, la vitesse du vent, l'aire balayée par le rotor et l'altitude du mât de l'éolienne : tout cela pris en considération lors du choix du produit. L'ensemble de ces éléments permet d'identifier la meilleure éolienne pour un site précis, une base des données météorologiques étant primordiale pour effectuer les calculs.

II. LES ACCIDENTS LES PLUS REDOUTES POUR UNE EOLIENNE

L'éolienne, en tant que source d'énergie propre et renouvelable dépendant principalement de la vitesse du vent, peut être exposée à des dangers multiples, causés essentiellement par le phénomène de survitesse de vent qui pousse la rotation des pales au bout de leurs limites de conception (Vitesse de déclenchement)

- Effondrement d'éolienne
- chute de pales
- projection de débris

III. LA FORMULE D'ALBERT BETZ

Albert Betz a réussi à définir la puissance que peut extraire l'éolienne de l'énergie cinétique du vent et en a conclu qu'une partie seulement de la puissance du vent est utilisée par la turbine d'où le coefficient de Betz de sorte que :

$$P = \frac{16}{27} \rho \left(\frac{1}{2}\right) S \cdot V^3 [\text{Watt}]$$

S: Surface balayée par le rotor (m²)

ρ : La masse volumique de l'air (1.25 kg/m³)
V: Vitesse du vent (m/s)

Coefficient de Betz $\frac{16}{27} = 0.5926$ ou 59.26%

la surface du rotor égale à $S = \frac{\pi D^2}{4}$

donc on peut écrire l'équation de Betz en fonction du cube de la vitesse du vent et du carré du diamètre

$$P = \frac{16 \rho}{27} \frac{\pi D^2}{4} V^3$$

dans le cas de $\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$

l'équation de Betz s'écrit

$$P_m = 0.37 \cdot S \cdot V^3$$

A. La puissance électrique récupérée

Outre le coefficient de Betz qui fait diminuer la puissance extraite en raison des frictions des pales et toute résistance mécanique, appelé coefficient de puissance[2]

$$P_m = C_p \cdot P_w$$

d'où:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3$$

la puissance électrique de sortie vers le réseau ou au consommateur est diminuée par le rendement de la boîte de transmission η_t et par le rendement du générateur électrique η_g sachant que le rendement combiné pour la transmission et le générateur est égal à 70% de la limite de Betz pour une hélice à trois pales ce qui justifie notre choix

Alors l'équation pourrait être développée de cette façon :

$$P_g = C_p \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3$$

Alors

$$P_{NET} = P_g = 0.203 \cdot D^2 \cdot V^3$$

IV. METHODE D'EXTRAPOLATION

A. Mikhail et Justus [3]

La mesure de la vitesse du vent est effectuée généralement à des hauteurs manométriques égales à 10 mètres du sol.

Toutefois, il serait plus intéressant de pouvoir les produire à des altitudes dignes d'intérêt telles que les hauteurs des éoliennes. Plusieurs auteurs ont proposé des formules empiriques permettant l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. La plus connue est la loi de la puissance de Mikhail et Justus. Ayant montré que pour des hauteurs inférieures à 100 m, l'effet de rugosité du sol ne peut être négligé lors de l'extrapolation de la vitesse du vent, Mikhail et Justus. [7] ont développé une seconde formule empirique, nommée la loi de puissance modifiée.

Soit une vitesse V_1 extrapolée d'une altitude Z_1 vers une altitude Z_2 , suivant la formule suivante :

$$V_2 = V_1 \left[\frac{Z_2}{Z_1} \right]^{\alpha_1}$$

L'exposant α_1 est sous la forme :

$$\alpha_1 = \frac{1}{\ln \frac{\bar{Z}}{Z_0}} - \left\{ \frac{0.0881}{1 - 0.0881 * \ln \frac{Z_1}{10}} \right\} \ln \left(\frac{V_1}{6} \right)$$

avec:

$$\bar{Z} = \exp \left[\ln (Z_1) + \ln (Z_2) \right] / 2$$

Z_1 : 10 mètres

Z_0 : est la rugosité du sol

V_1 : Vitesse du vent à altitude de 10 mètres

V_2 : Vitesse du vent à altitude de Z_2

Cela doit être pris en considération du fait que le calcul de puissance est très important comme la nécessité de connaître plus exactement la vitesse du vent à laquelle les pales des éoliennes sont exposées

B. Modèle de Spera et Richards

D'après l'étude de Spera et Richards [4], le coefficient peut être calculé en fonction de la rugosité du terrain et de la vitesse de référence comme suit :

$$\alpha = \left(\frac{Z_0}{Z_1} \right)^{0.2} \left[1 - 0.55 \cdot \log (V_1) \right]$$

Ce modèle a été dérivé d'un certain nombre d'observations faites à travers plusieurs endroits des Etats Unis. De plus il fut utilisé au centre de recherche Lewis de la Nasa [5] pour concevoir des éoliennes à grande échelle.

C. Modèle de Mikhail [8]

En 1985 Mikhail a repris le modèle de modifié et a proposé un modèle qui prend en considération des conditions de stabilité moyenne. Le modèle est basé sur le modèle de la loi de puissance et le modèle de similitude où le coefficient modifié est donnée par

$$\alpha_{m_2} = \alpha_m + b \cdot \ln(V_1)$$

avec:

$$\alpha_m = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z_g}{Z_0}\right)} + \left(\frac{0.088}{1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \right)$$

L'expression du coefficient modifié devient ainsi :

$$\alpha_{m_2} = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z_g}{Z_0}\right)} + \left(\frac{0.088 - 0.088 \cdot \ln(V_1)}{1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \right)$$

D. Loi de puissance dite à coefficient variable

Pour tenir compte des différentes valeurs de la rugosité du terrain, Knidiri et Laouina [6] lors de l'établissement de l'atlas éolien du Maroc en 1986, ont proposé d'écrire l'expression sous la forme suivante :

$$\alpha = \frac{x - 0.088 \cdot \ln(V_1)}{1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)}$$

Où le coefficient x varie en fonction de la classe de rugosité comme suit :

- x= 0.25 pour $0.005 \geq Z_0 > 0m$
- x=0.31 pour $0.05 \geq Z_0 > 0.005m$
- x=0.37 pour $0.5 \geq Z_0 > 0.05m$
- x=0.48 pour $4 \geq Z_0 > 0.5m$

V. CONCEPTION DU PROGRAMME DE SECURITE

Pour concevoir notre programme dans le but d'améliorer la sécurité des éoliennes nous devons prendre en considération les paramètres de ces dernières tels que le diamètre du rotor, la longueur du mât, sa vitesse de déclenchement "vitesse cut-out" : ces données figurent dans la fiche de spécification de toute éolienne fabriquée.

Il est également indispensable de disposer d'une base de données météorologiques de la région concernée par l'installation (Vitesse maximale journalière pendant 5 ans) et de connaître le coefficient de rugosité du sol de la région visé

A. Objectif du programme

Le programme consiste à étudier chaque éolienne proposée par le client dans les circonstances météorologiques de la région précise en procédant à l'élimination de celles qui ne peuvent supporter la vitesse du vent, les types d'éoliennes retenues seront classées selon leurs performances ou économiquement en fonction des choix du client

Cela va aussi nous aider à comparer entre les quatre méthodes d'extrapolation cités ci dessus qui sera la meilleure pour une bonne prédiction

B. Programmation avec le langage PYTHON

PYTHON est un langage de programmation à base de C++ très utilisé à travers le monde en raison de sa compatibilité avec la majeure partie du web. Cette caractéristique a conduit au choix de ce langage pour sa faculté à obtenir les informations du web grâce à des sous programmes spécifiques, la nécessité de disposer de données réelles dans notre programme étant primordiale afin de mettre en épreuve sa crédibilité prévisionnelle.

Après la conception du programme avec le PYTHON, une simulation du programme doit être faite dans le but d'évaluer son efficacité à prédire les accidents. Pour cela nous avons collecté 37 accidents différents enregistrés dans le monde dans les dernières années et recueilli les données relatives au lieu, la date et la spécification de l'éolienne, tout en alternant entre les 4 modèles d'extrapolation.

Considérant que le choix de la méthode d'extrapolation vertical de la vitesse du vent est très important pour le programme, nous allons procéder à une comparaison entre les quatre modèles cités précédemment ainsi que mettre en évidence les limites de chaque modèle au cours de cette simulation

VI. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

A. Pour le modèle Spera et Richards

La simulation du programme avec le modèle Spera et Richards a donné comme résultats 26 accidents prédits sur 37 ce qui correspond à un taux de 70.27% .

La limite concernant ce modèle c'est que la vitesse du vent n'excède pas les 65.8 m/s (237km/h) assez large pour couvrir les 37 accidents de sorte qu'en aucun cas le programme n'a donné des valeurs illogiques telles que la vitesse à une hauteur élevée est inférieure à celle de la vitesse référence ce qui est impossible physiquement "la vitesse du vent augmente avec la hauteur" [9].

B. Pour le modèle Mikhail et Justus

Lors de la simulation, ce modèle a montré que son intervalle de travail est trop étroit : ses limites étant de $13.6 < V_1 < 44.9$ m/sec

Le programme a donné comme résultats 24 accidents prédits sur 37, soit un taux de réussite de 64.86%

C. Pour le modèle Mikhail

Plus précis mais il intervient dans un intervalle étroit de l'ordre de $6.2 < V_1 < 20.4$ m/sec.

Ne couvrant pas la majorité des accidents, le résultat donne une prédiction de 45.94 % du cas réel

D. Pour le modèle de la loi puissance dite à coefficient variable

Le modèle de Kindiri&Laaouini donne d'assez bons résultats lors de la simulation du programme de sorte que la prédiction avec ce modèle frôle les 67.56% comme taux de réussite

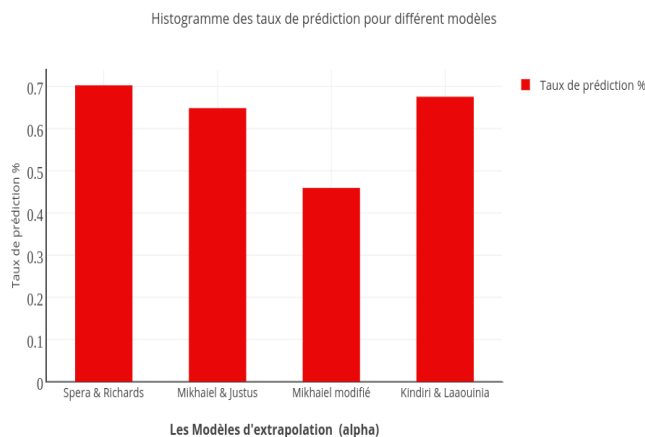


Fig. 1 Histogramme des taux de prédiction pour différents modèles

La figure 1 englobe les résultats de la simulation du programme pour différents modèles d'extrapolations, la méthode de Spera& Richards a le meilleur taux de prédiction suivie par le modèle de Kindiri&Laaouinia

VII. ETUDE ET ANALYSE DES MODELES D'EXTRAPOLATION

Pour mieux comprendre et analyser les quatre modèles tous basés sur la méthode de la loi de puissance et différents dans le calcul de l'exposant "alpha", nous avons établi une étude de profil "alpha" en fixant certains paramètres et variant d'autres de manière à exposer les limites de chaque modèle.

A. Etude de profil d'alpha en fonction de la vitesse référence (météo)

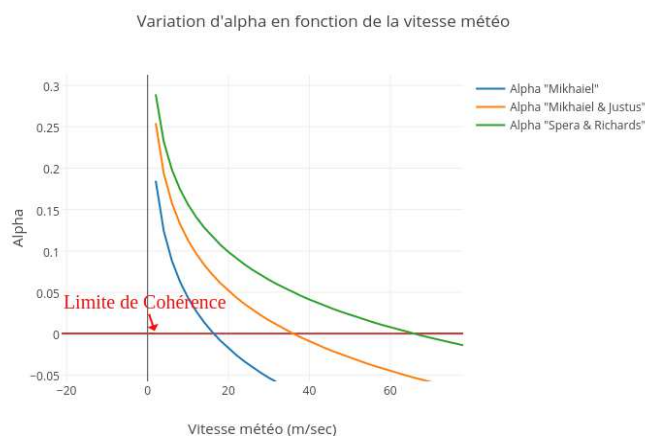


Fig. 2 Variation d'alpha en fonction de la vitesse météo (3 modèles)

Ce graphique montre la variation d'alpha des trois modèles en fonction de la vitesse météo (m/sec) et met en évidence les limites de cohérence de chaque modèle.

Il est constaté que le modèle de Spera& Richards couvre un assez large intervalle de bon fonctionnement par rapport aux deux autres modèles "Mikhail" et "Mikhail& Justus", avant d'atteindre sa limite, sachant que les paramètres hauteur de l'éolienne et rugosité ont été fixés respectivement à $H_e=80$ m , $Z_0=0.05$ m

Pour le modèle de Kindiri&Laaouinia qui dépend de la variable x selon l'intervalle de la rugosité, un graphique lui est dédié

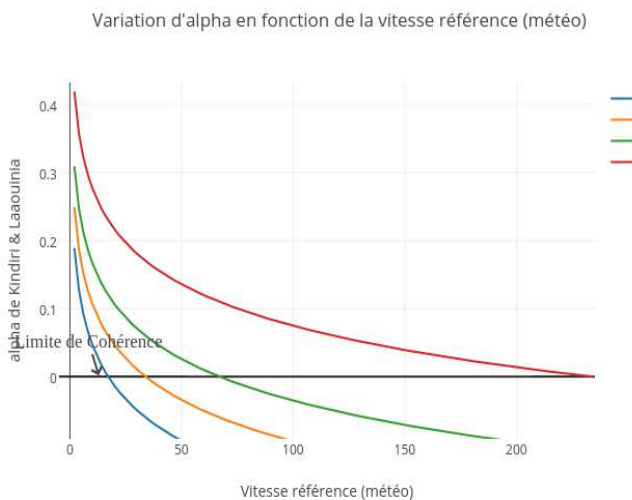


Fig. 3 Variation d'alpha de Kindiri&Laaouinia en fonction de la vitesse météo

la figure(3) comprend quatre courbes chacune représentant un certain intervalle de rugosité : ainsi on peut dire que l'équation de l'alpha établie par Kinidiri et Laaouinia en 1986 suit l'une des quatre courbes selon la valeur de la rugosité:

- $x=0.25$ pour $0.005 \geq Z_0 > 0m$
- $x=0.31$ pour $0.05 \geq Z_0 > 0.005m$
- $x=0.37$ pour $0.5 \geq Z_0 > 0.05m$
- $x=0.48$ pour $4 \geq Z_0 > 0.5m$

Interprétation

On distingue dans le graphe (figure3) que pour la courbe $x=0.25$ la limite est de 17m/sec , pour $x=0.31$ la courbe est limitée à 44m/sec, celle de $x=0.37$ n'excède pas les 67m/sec enfin la dernière peut aller jusqu'a 240 m/sec mais c'est pour une rugosité très élevée (la hauteur de l'éolienne est fixée à 80m).

Pour le graphe (figure 2) nous constatons que le modèle de Spera& Richards couvre une assez large étendue avant d'atteindre la limite logique d'ordre 65.8m/sec suivi par le modèle de Mikhaïel& Justus avec une plage médiane limitée à 45m/sec. En dernier, le modèle de Mikhaïel qui n'excède pas 20m/sec

B. Etude de profile d'alpha en fonction de la rugosité

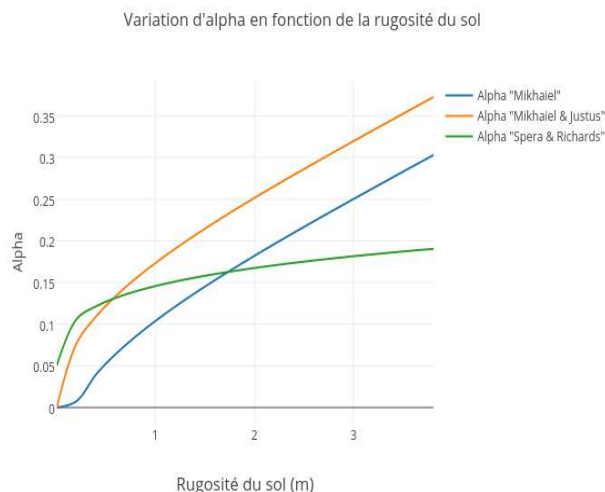


Fig. 4 Variation d'alpha en fonction de la rugosité (3 modèles)

Le graphe (Figure 4) montre l'influence du paramètre rugosité sur l'exposant "alpha" : ce dernier joue un rôle très important dans l'extrapolation verticale

On constate que le modèle "Spera & Richards" est presque indépendant de ce paramètre. Par contre les deux modèles "Mikhaïel" et "Mikhaïel & Justus" sont influencés par la rugosité de manière similaire sauf pour les valeurs très faibles de ce paramètre

VIII. CONCLUSION

Ce programme nous a permis de choisir l'éolienne la mieux indiquée pour une région donnée afin d'avoir la certitude que celle-ci ne courra aucun danger, opérera en continu et pourra produire de l'énergie tout au long de sa durée de vie.

Ainsi on déduit que le modèle "Spera & Richards" à une assez bonne prédiction dans le programme

Le programme sera amélioré (Python) afin qu'il puisse être à la portée du client, facile à utiliser et affichant plus clairement les résultats ce qui le rendra accessible pour tout investisseur

IX. PERSPECTIVE

Nous visons à améliorer le programme de sorte à augmenter son taux de prédiction entre autre nous nous engageons aussi pour modéliser une méthode d'extrapolation qui possède une bande de travail assez large

REFERENCES

- [1] The World Wind Energy Association, «2014 Half-year Report», WWEA Head Office Charles-de-Gaulle- Str. 5 53113 Bonn, 2014 Germany.
- [2] Albert BETZ "Wind energie und ihre Ausnutzung durch Windmülen," "Wind Energy and its extraction through Windmills," Germany, 1926.
- [3] Mikhail et al., 'Comparaison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis', Wind Engineering, 1981, Vol. 5, N°2.
- [4] Spera DA, Richards TR. Modified power law equations for vertical wind profiles. In: Conference and workshop on wind energy characteristics and wind energy siting, Portland, OR, USA; June 1979.
- [5] Spera DA. Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering. New York: ASME Press; 1994.
- [6] Knidiri F. and Laaouina A. (1986) L'énergie éolienne au Maroc, CDER.
- [7] Mikhail, A. S., and Justus, C. G., "Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis," Wind Engineering, Vol. 5, No. 2, 1981
- [8] Mikhail, A. S., Height Extrapolation of Wind Data, Journal of Solar Energy Engineering, 107(1985)10-14
- [9] N. Kasbadji Merzouk, Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen, 2006, pp.13