

Analyse des Contraintes Mécaniques Agissant sur un Pylône Haubané d'Aérogénérateur et Technologies Mises en Œuvre pour son Installation

F. Belhame1*, S. Moussa**, K. Benfarhat** et F. Kharchi***

*Laboratoire structure – Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), Soudania – Alger-Algérie

** Laboratoire énergie éolienne – Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), Bouzaréah – Alger-Algérie

***Département de Génie Civil-Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène (USTHB), Bab Ezzouar- Alger-Algérie

Résumé – *Cet article présente une analyse des contraintes mécaniques agissant sur des pylônes haubanés d'aérogénérateurs de puissance et les technologies mises en œuvre pour leur installation. Le pylône supportant la nacelle, le rotor et le câble électrique constitue l'élément important qui conditionne dans une très large mesure la stabilité de l'installation dans son ensemble. Les haubans, destinés à assurer l'équilibre du pylône, doivent être judicieusement ancrés au sol ; le choix du type de ces ancrages dépend essentiellement de la nature du sol, de sa capacité portante et des efforts qui agissent sur l'installation. L'étape importante relative à l'installation de l'aérogénérateur doit prendre en considération les moindres détails comme l'emprise au sol, les contraintes mécaniques et les précautions électriques (mise à la terre, foudre, etc.) afin de bien s'assurer de sa fiabilité et de le garder en bon état de fonctionnement tout au long de sa vie qui doit s'étaler sur une durée d'au moins 20 ans.*

Abstract – *This article presents an application of the rules of analysis and installation of the gued pylons of aerogenerators of average power. The pylon supporting the nacelle, the rotor and the electric cable constitutes the significant element which conditions in a very broad measurement the stability of the installation as a whole. The stays, intended to ensure the balance of the pylon, must be judiciously anchored on the ground; the choice of the type of these anchorings depends primarily on the nature of the ground, its bearing capacity and the efforts which act on the installation. The significant stage relating to the installation of the aerogenerator must take into account the least details like the influence on the ground, the precautions mechanical and electric, in order to ensure itself well of its reliability and to keep it in good operating condition throughout its life which must be spread out over one duration of at least 20 years.*

Mots clés : Aérogénérateur – Pylône – Haubans – Stabilité – Ancrage – Vent extrême – Installation.

1. INTRODUCTION

Pour assurer la réussite d'un projet d'installation d'un aérogénérateur de puissance, il est fortement recommandé de respecter rigoureusement les étapes chronologiques suivantes :

1. le choix approprié du site d'installation ;
2. le choix du type de pylône ;
3. l'analyse et le calcul des multiples contraintes agissant sur le pylône;
4. l'étude et le dimensionnement de la fondation ;
5. l'équilibrage judicieux des haubans ;
6. la répartition rigoureuse des points d'ancrage au sol ;
7. l'étude du montage et du démontage rapides et aisés du pylône pour les exigences et la nécessité d'un entretien périodique et régulier de l'aérogénérateur : opération de maintenance qui conditionne dans une très large mesure la durée de vie et les performances énergétiques de toute l'installation

2. CHOIX APPROPRIE DU SITE D'INSTALLATION

Les performances énergétiques d'un aérogénérateur dépendent dans une très large mesure du « gisement éolien » du site sur lequel il sera installé [1]. Les caractéristiques principales de ce gisement éolien sont données par la régularité et la vitesse du vent à différentes altitudes.

Ces caractéristiques permettent de quantifier ce gisement énergétique grâce à un travail d'analyse et de traitement statistique des données sur une longue période. L'extrapolation en altitude de ces caractéristiques est donnée avec une approximation satisfaisante par des codes de calculs spécialisés le plus souvent calés à des valeurs mesurées lors de campagnes effectuées in situ [4, 5, 6].

Les vents les plus intéressants sont des vents réguliers ayant une vitesse entre 6 à 10 m/s. La formule de base du calcul de la puissance récupérée P_r du vent est donnée par l'expression suivante [7] :

$$P_r = 0.5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \tag{1}$$

C_p étant le coefficient de performance; ρ la masse volumique de l'air;
 S la surface perpendiculaire à l'écoulement du vent ; v la vitesse du vent.

Cette puissance varie donc en fonction du cube de la vitesse du vent et signifie donc pour les grandes puissances, un choix de sites fortement ventés et des points très élevés par rapport au sol.

3. CHOIX DU PYLONE

Parce que la vitesse du vent augmente avec l'altitude, l'aérogénérateur est monté sur un pylône : plus le pylône est haut et plus grande sera la puissance récupérée [8]. Il existe donc plusieurs alternatives pour le choix des pylônes [9, 10, 11].

3.1. Choix du type de pylône

Les pylônes d'aérogénérateurs de puissance les plus utilisés actuellement sont de deux types [2, 3] :

1. les pylônes en treillis (fig.1);
2. les pylônes tubulaires haubanés (fig.2).

Actuellement les pylônes en treillis sont rejetés pour leur encombrement, leur poids excessif, l'inconvénient de leur apparence visuelle et surtout leur difficulté de mise en oeuvre. Les pylônes tubulaires haubanés présentent par contre de nombreux avantages et la meilleure solution du fait surtout de leur facilité de montage et d'entretien ; on gagne également grâce à une réduction significative en poids et donc en coût de la structure portante. Notre choix s'est porté donc sur ce type de pylône qui a l'avantage indéniable d'être aujourd'hui largement adopté par de nombreux constructeurs d'aérogénérateurs [11, 12, 13, 14, 15, 16] qui ont développés encore davantage toutes les techniques et les technologies les plus adaptées de sa mise en oeuvre.



Fig. 1: pylône en treillis



Fig. 2: pylône haubané

4. ANALYSE DES CONTRAINTES AGISSANT SUR LE PYLÔNE HAUBANE [11]

4.1. Bilan des forces agissant sur le pylône

L'analyse statique d'un pylône haubané consiste à identifier en priorité d'abord l'ensemble des efforts agissant sur celui-ci. Les réactions et les tensions dans les haubans peuvent être calculées ensuite par la Méthode des Eléments Finis (MEF) ou toute autre méthode conduisant au même degré de sécurité. Le bilan sera la résultante des forces appliquées suivantes (fig.3) :

1. la pression du vent extrême sur le pylône et les haubans (Combinaison d'actions la plus défavorable ou limite) ;
2. la poussée développée par la turbine au sommet du pylône ;
3. le poids de la tour.

Selon le règlement UBC 1997 (section 1613) et pour un vent extrême correspondant à une exploitation sévère et poussée du pylône ; la pression du vent est déterminée par l'équation suivante :

$$P = C_e \cdot C_q \cdot q_s \cdot I_w \quad (2)$$

C_e est un coefficient d'exposition et de hauteur ; C_q est un coefficient de pression pour la structure ou une partie de celle-ci ; q_s pression constante du vent à la hauteur de référence de 10 m environ. I_w est le facteur d'importance.

La force développée par la turbine est donnée par la formule (1) : $P_r = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$ (3)

v étant la vitesse du vent dans le cas limite (vent extrême).

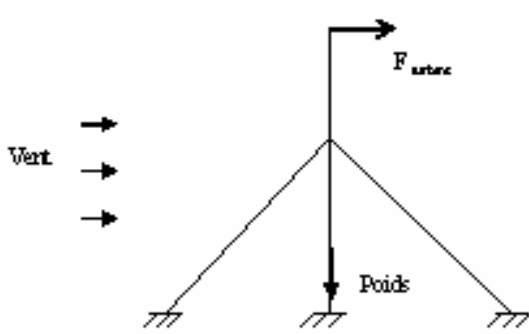


Fig. 3: bilan des forces statiques agissant sur le pylône

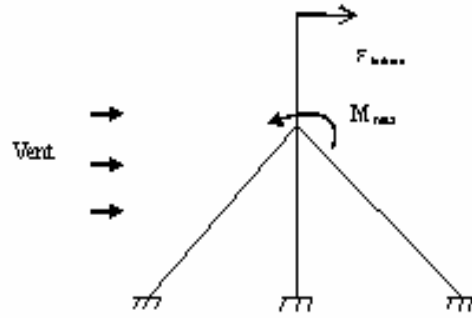


Fig. 4: point critique de pylône haubané

4.2. Résultats de l'analyse statique

L'analyse statique d'un pylône haubané consiste à déterminer :

1. Le coefficient de sécurité pour les différents points critiques du pylône (point du moment maximal, point de l'effort axial maximal, etc.) ;
2. Les efforts de traction dans les haubans et les points d'ancrage ;
3. Les réactions au point d'encastrement du pylône ;
4. Vérification et compatibilité avec les recommandations de calcul du pylône (UBC de 1997 ou autres règles en vigueur).

4.3. Poussée du vent sur les haubans

Le calcul de la poussée du vent sur les câbles est basé sur le même principe que celui du calcul de la pression du vent sur le pylône. Soit Φ_h et l_h le diamètre et la longueur des haubans ; la projection de l'hauban servant au calcul de la poussée du vent est donnée par la relation (4) :

$$A_h = \Phi_h \cdot l_h \tag{4}$$

Ainsi la force développée par l'action du vent sur les haubans est donnée par la formule : $F_h = A_h \cdot P$

Où P est la pression du vent défini dans l'équation (2) et qui a été utilisée pour le calcul du pylône. Généralement cette force est faible et peut être négligé dans les calculs ultérieurement.

4.4. Points critiques du pylône haubané [11]

Dans un pylône haubané, les points les plus critiques qui doivent être dimensionnés avec sécurité sont les points de moment maximum et de l'effort normal maximum. La fig.4 suivante montre que le point critique est le point le plus haut d'attachement des haubans au pylône. Des cas de pylônes mal dimensionnés se sont pliés et se sont fissurés à cet endroit.

Le coefficient de sécurité de cette section critique doit toujours être vérifié. Celui-ci est donné par la formule suivante :

$$CS_{\text{sommet}} = \sigma_{\text{acier}} / \sigma_{\text{flexion}} \tag{5}$$

Pour des pylône haubanés d'aérogénérateurs, ce coefficient de sécurité est d'au moins 4. Le second point critique est celui qui correspond à l'effort maximal résultant de la décente de charges. Ce point est situé à la base du pylône. La fig.5 montre ce point situé à la base du pylône.

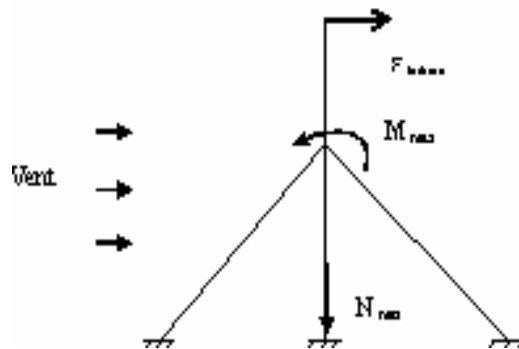


Fig. 5: point critique à la base du pylône

Le coefficient de sécurité pour ce point situé à la base doit être évalué par application de la formule (6) :

$$CS_{\text{base}} = \sigma_{\text{acier}} / \sigma_{\text{base}} + \sigma_{\text{flexion base}} \tag{6}$$

5. CONCEPTION ET VERIFICATION DE LA FONDATION

La fondation d'un pylône peut être de forme carrée, rectangulaire ou circulaire. Cette forme est généralement la plus utilisée car elle s'adapte à la forme du pylône et présente une symétrie dans tous les sens. Il faut toujours vérifier la capacité portante du sol sous l'effet de la pression développée par le pylône au droit de la fondation [11, 13, 17]. La pression sur le sol est la réaction due au vent sur le pylône et le poids total cumulé sur la fondation.

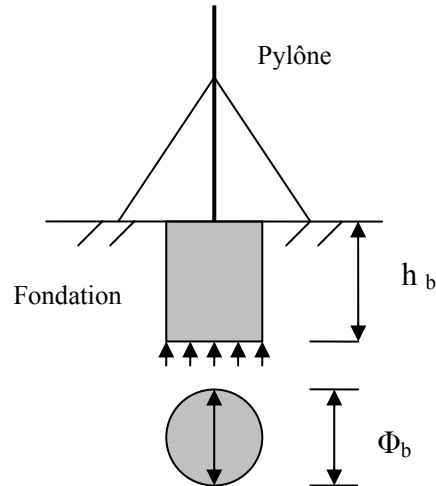


Fig. 6: conception de la fondation et pression sur le sol

Si W_t désigne le poids total agissant sur la fondation, on vérifie le pylône vis-à-vis de la capacité portante du sol de fondation ; la relation utilisée pour effectuer cette vérification est :

$$W_t = W_{\text{béton}} + W_{\text{vent}}$$

$$\sigma_{\text{sol}} = W_t / (\pi \cdot r_b^2) \leq \sigma_{\text{admissible}} \quad (7)$$

6. ANCRAGE DES HAUBANS

6.1. Configuration des points d'ancrage

La configuration des points d'ancrage est telle qu'elle permet d'assurer un équilibre statique du pylône qui représente le facteur essentiel de conception d'une éolienne. La force de traction exercée et déterminée par l'analyse précédente doit être telle que l'effort repris par chaque hauban soit admissible ; c'est-à-dire que la contrainte engendrée dans le brin de l'hauban soit inférieure à la contrainte ultime du câble de l'haubanage. Tout déséquilibre du pylône peut causer des dégâts humains et matériels important. Selon la hauteur du pylône, on peut être amené à utiliser 2,4,6,8 etc. dont les points d'ancrage sont répartis sur un cercle d'une façon équidistante.

6.2 Réalisation des points d'ancrage

Il existe quatre types d'ancrage utilisés pour assurer la fixation des haubans assurant l'équilibre du pylône ; le type choisit est fonction du support destiné à recevoir le pylône. Le tableau 1 suivant montre les différentes alternatives possibles.

Tableau 1 : différents types de supports possibles [11]

Type de support	Ancrage recommandé
Sable	De béton
Gravier	De béton
Argile	Type Duckbill
Sol rocailleux	Type Duckbill
Sol graveleux	Type Duckbill ou Auguer
Roche tendre	Boulon long à expansion
Roche dure	Boulon court à expansion

Les figures 7a et 7b illustrent schématiquement ces types d'ancrage largement usités:

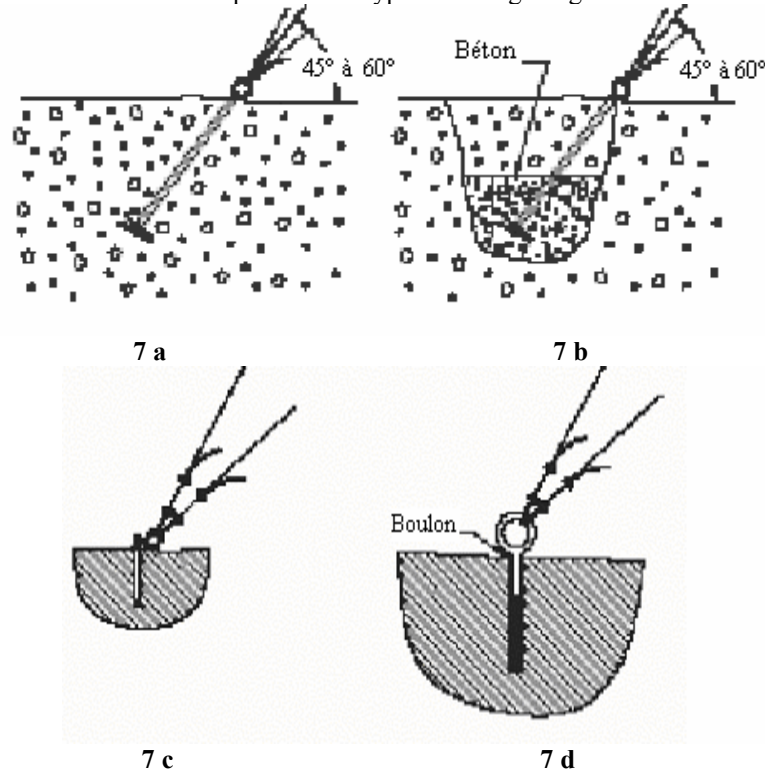


Fig. 7: les différents types d'ancrages rencontrés

7. TECHNIQUES MISE EN ŒUVRE POUR LE SOULEVEMENT DU PYLÔNE

On soulève généralement le pylône d'un aérogénérateur avec une flèche de levage. Avant de soulever le pylône, il faut s'assurer que tous les colliers sont serrés judicieusement ainsi que tous les boulons sur les différents crochets des câbles de haubanage. La fig.8 et la fig.9 illustrent clairement le procédé de manutention du pylône ainsi que le détail d'un crochet de câble haubané.

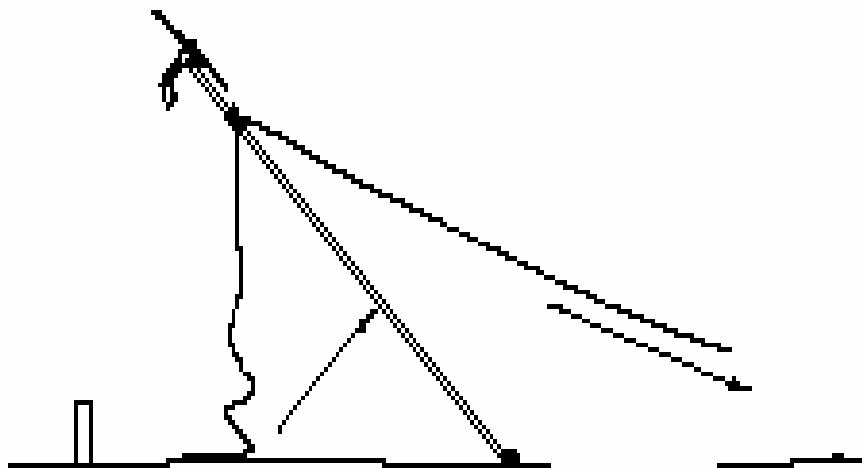


Fig. 8: procédé schématique simplifié de levage du pylône

REFERENCES

- [1] L. Soder and T. Ackerman, "Wind Energy Technology and Current Status:a Reviews", Renewable and sustainable energy reviews; vol.4:315-374, 2000
- [2] F. Belhamel, "Etude et dimensionnement des structures portantes d'aérogénérateurs" Rapport interne N°1- Laboratoire d'énergie éolienne – CDER - 2002

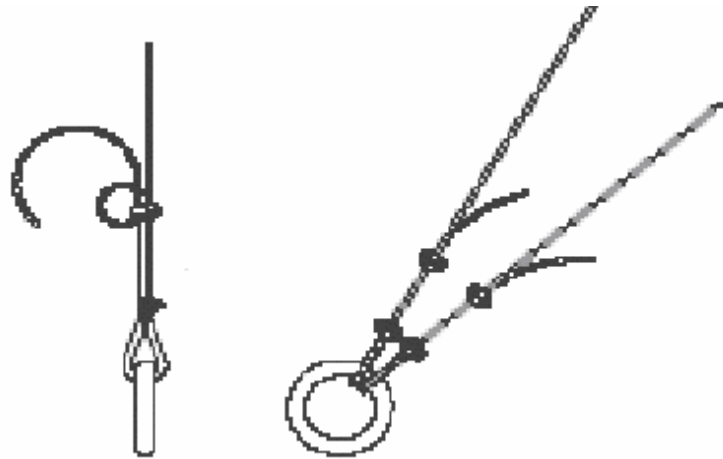


Fig. 9: détail d'un crochet de câble haubané

- [3] F. Belhamel, "Analyse des contraintes agissant sur un pylône haubané d'aérogénérateur de puissance et techniques mise en œuvre pour son installation", Rapport interne N°2 – Laboratoire de l'énergie éolienne – CDER – 2003
- [4] L.Hamane et A.Khellaf, "Evaluation des Ressources Energétiques Eolienne de l'Algérie" CHEMS'2000, Alger 2000 Algérie
- [5] R.Hamouche, "Atlas vent de l'Algérie" Office National de la Météorologie, Dar el Béida - 1990 – Alger
- [6] N.Kasbadji Merzouk et L.Hamane, "Atlas Vent, Limites et Méthodes d'interpolation : Application au nord est de l'Algérie" Al'SIG 99, Alger 1999
- [7] N.Kasbadji Merzouk, "Wind Energy Potential of Algeria", Inter.J.Renewable Energy, vol. 21/3-4. pp553-562-(2000)
- [8] A.S. Mikhaeil et C.G. Justus, "Comparison of height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis", Wind Engineering, vol.5.N°2 – 1981, pp91-106
- [9] A.S. Mikhaeil, "Height Extrapolation of Wind Data" Journal of Solar Energy Engineering vol.107, feb.1985 pp.10-14
- [10] A. Mullane, G. Lightbody and R.Yacimini, "Adaptive Control of Variable Speed Wind Turbines", Rev. Energ. Ren: Power Engineering (2001)101-110
- [11] Southwest Windpower, Inc. site: <http://www.windenergy.com>, Report # 00003-Tower Analysis 2-13-01- 1 ADeril 2000
- [12] Site de Vestas (Constructeur d'aérogénérateurs): [http:// www.vestas.com](http://www.vestas.com)
- [13] Site de l'Association Wind Power de l'industrie Danoise : <http://www.windpower.org>
- [14] Site de US Department of Energy Wind Programs: <http://www.eren.doe.gov>
- [15] American Wind Energy Association www.awea.org/
- [16] European Wind Energy Association <http://www.ewea.org/>
- [17] Guide tour on wind energy <http://www.windpower.dk/tour/index.htm>