

Etude de l'hélice d'une éolienne de 5 kW

M. Nadjah*, M. Khechana, L. Laiche, T. Ouksel† et C. Mahfoudi

Département de Génie Mécanique, Institut des Sciences Technologiques, Aïn Beïda
Centre Universitaire Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, Algérie

Résumé - Dans ce travail, on présente une démarche logique nécessaire à la réalisation de l'hélice d'une éolienne de faible puissance. Cette étude fait partie d'un projet de recherche visant la conception et la construction d'une éolienne de faible puissance destinée à l'éclairage de l'atelier de l'Institut des Sciences Technologiques. La présente étude discute les éléments essentiels nécessaires à la concrétisation de l'hélice. Partant de la seule donnée qui est la puissance électrique désirée, nous explicitons la transformation de l'énergie éolienne en énergie mécanique, formulation de Betz, la recherche du profil le plus approprié de la pale, le diamètre de l'hélice et la vérification d'une pale face aux différentes sollicitations.

Abstract - In this work, we present a necessary logical approach to realize a propeller of a low power wind turbine. This study is a part of a research project aiming at the conception and the construction of a wind turbine of low power which is intended for lighting the workshop of the Technological Sciences Institute. In this present study, we discuss the main components that are necessary for the realization of the propeller, having as unique initial data the needed electric power value and on the other hand, we clarify: the conversion principle of the wind energy to mechanical energy, Betz formulation, the research of the most appropriate pale profile, the propeller diameter and the pale response to various solicitations.

Mots clés: - Eolienne - Hélice - Pale - Nacelle - Multiplicateur de vitesse - Mât.

1. INTRODUCTION

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable idéale. Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre, elle ne nécessite aucun carburant, elle ne crée pas de gaz à effet de serre. Chaque MWh d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne de CO₂ rejeté chaque année par la production d'électricité d'origine thermique. Une éolienne est constituée principalement de métal et de matière plastique, elle ne produit pas de déchets toxiques ni radioactifs. Donc la pollution est quasi nulle.

La démarche algérienne dans ce domaine d'énergies renouvelables reste timide si on se compare avec les pays voisins sachant que notre pays est exposé au vent, d'une vitesse considérable presque toute l'année.

Notre contribution à travers la présente étude, vient pour combler ce retard en proposant une démarche théorique qui sera suivie par une réalisation pratique d'une éolienne destinée à la production de l'énergie électrique nécessaire à l'éclairage de notre atelier. Ainsi dans cet article, on s'attache tout d'abord à présenter les points essentiels à déterminer pour faire une réalisation justifiée.

Dans la première section, on exposera les différents types d'éoliennes et leurs compositions. Dans la deuxième section, nous décrivons la détermination de l'hélice à

* l_khecmissi@yahoo.fr _ khechana_moh@yahoo.fr

† ouksel@yahoo.fr _ l_khecmissi@yahoo.fr _ mahfoudi_c@yahoo.fr

savoir: le nombre, le profil des pales, la formulation de Betz., la vérification d'une pale aux différentes sollicitations et on termine par le calcul de la vitesse angulaire de l'hélice en fonction de celle du vent. La troisième section est consacrée à la proposition d'une variante de multiplicateur de vitesses et le calcul de ses différents organes.

2. L'ÉOLIENNE

2.1 Composition d'une éolienne

Une éolienne est composée des trois parties essentielles: l'hélice, la nacelle qui comporte l'ensemble multiplicateur - génératrice et le mât, (Fig. 1).

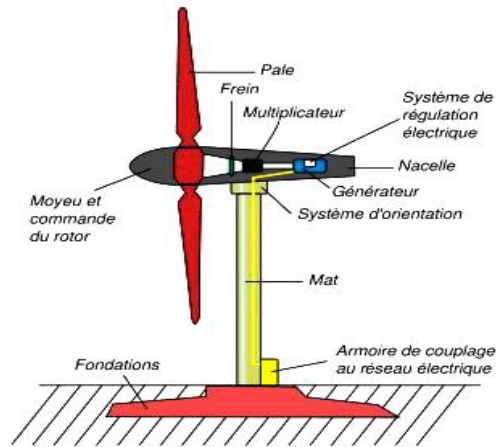


Fig. 1: Schéma d'une éolienne

2.2 Le parc éolien

Dans le cas où on veut produire une grande énergie électrique destinée à la commercialisation, on installe un parc éolien qui se présente comme un ensemble d'éoliennes implantées en lignes dans un endroit exposé aux vents forts. Ces informations doivent être fournies par les stations de la Météorologie.

3. L'HELICE

3.1 Composition

Elle est composée de trois pales de diamètre $D = 4$ m et d'un moyeu de diamètre $d = 0.2$ m. (Fig. 2).

3.2 Le profil de pale

Les choix de profils sont nombreux et répondent à des besoins particuliers. Dans notre cas, nous utilisons un profil simple, efficace et qui a fait ses preuves depuis des dizaines d'années. Dans le cas présent, il s'agit d'un profil NACA 4412 (Fig. 3) très performant, mais légèrement difficile à réaliser. Pour cela, nous avons déterminé les différents points du profil et ce à une dizaine de sections variables. Le travail a été répété pour une pale non vrillée et une autre vrillée.

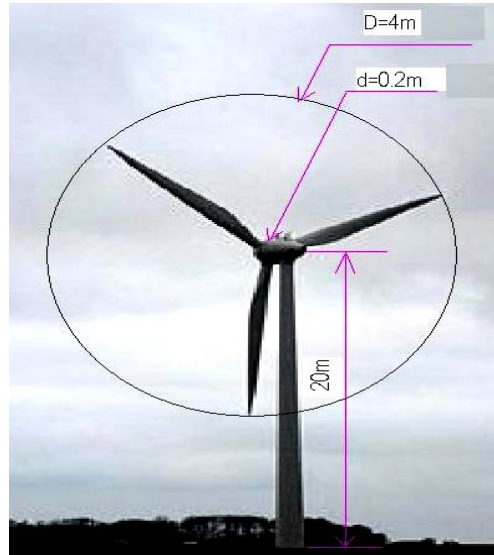


Fig. 2: Dimensions globales de l'éolienne

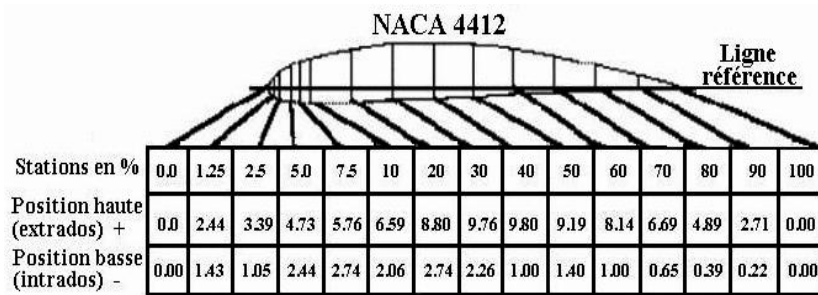


Fig. 3: Profil NACA 4412

3.3 Puissance de l'éolienne

La puissance du vent contenue dans un cylindre de section S est:

$$P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho \times S \times V^3 \tag{1}$$

3.4 Formule de Betz

Betz a démontré que la puissance maximale récupérable est:

$$P_{\text{max}} = \frac{16}{23} \times P_{\text{cinétique}} = \frac{8}{27} \rho \times S \times V^3 \tag{2}$$

Démarche: Il faut tout d'abord estimer le diamètre suffisant du rotor qui peut fournir la puissance recherchée. Pour cela, on a effectué une série de tests pour différentes valeurs du diamètre du rotor et de la vitesse du vent.

Le code de calcul utilisé nous a aidés pour fixer les valeurs suivantes:

$D_r = 4 \text{ m}$, diamètre du rotor. $D_m = 0.2 \text{ m}$, diamètre du moyeu. $V_v = 8.06 \text{ m/s}$, vitesse du vent. La puissance mécanique récupérable est de 5462 Watt. $L_p = 1.9 \text{ m}$, longueur de la pale et 177,51 mm la corde de la pale.

Les coordonnées de l'intrados et de l'extrados sont exprimées en pourcent de la corde du profil NACA4412 (**Tableau 1 et 2**), et on a pu trouver notre profil aux sections progressant d'un pas de 5 % du sommet jusqu'au pied de la pale. Ces données ont été rassemblées dans des tableaux pour permettre de concevoir le modèle 3D de la pale.

3.5 Résultats de la pale vrillée

Tableau 1: Coordonnées en % de la corde du NACA4412 à 100 % d'envergure. 26 points pour l'intrados, 26 pour l'extrados

17,75 Corde	100 % Envergure	
X	Y extrados	Y intrados
0.000	0.000	0
0.089	0.294	-0.1572
0.133	0.347	-0.1970
0.222	0.434	-0.2545
0.444	0.600	-0.3459
0.888	0.840	-0.4408
1.331	1.022	-0.4869
1.775	1.171	-0.5083
2.663	1.400	-0.5111
3.550	1.561	-0.4849
4.438	1.670	-0.4453
5.325	1.732	-0.4011
6.213	1.755	-0.3579
7.100	1.740	-0.3200
7.988	1.696	-0.2850
8.875	1.632	-0.2483
9.763	1.547	-0.2118
10.650	1.445	-0.1767
11.538	1.325	-0.1442
12.425	1.189	-0.1151
13.313	1.036	-0.0897
14.200	0.867	-0.0684
15.088	0.681	-0.0513
15.976	0.479	-0.0381
16.863	0.260	-0.0286
17.751	0.023	-0.0222

Tableau 2: Coordonnées en % de la corde du NACA4412 à 10 % d'envergure. 26 points pour l'intrados, 26 pour l'extrados

77,07 Corde	100 % Envergure	
X	Y extrados	Y intrados
0.000	0.000	0
0.385	0.385	-0.6826
0.578	0.578	-0.8551
0.963	0.963	-1.1050
1.927	1.927	-1.5016
3.853	3.853	-1.9139
5.780	5.780	-2.1139
7.707	7.707	-2.2070
11.560	11.560	-2.2188
15.413	15.413	-2.1055
19.267	19.267	-1.9335
23.120	23.120	-1.7413
26.973	26.973	-1.5538
30.827	30.827	-1.3895
34.680	34.680	-1.2375
38.533	38.533	-1.0782
42.387	42.387	-0.9194
46.240	46.240	-0.7672
50.093	50.093	-0.6261
53.947	53.947	-0.4996
57.800	57.800	-0.3895
61.653	61.653	-0.2971
65.507	65.507	-0.2226
69.360	69.360	-0.1654
73.213	73.213	-0.1240
77.067	77.067	-0.0962

La pale d'une éolienne est vrillée et à section variable (Fig. 4). C'est pour cela que nous allons nous intéresser à cette variante. L'angle de vrillage est de 0° à 100 % de corde, de 11.1° à 50 % et de 52.8° à 10 %. (**Tableau 3**)

Pour calculer le vrillage (Fig. 5), on fait fonctionner notre profil à incidence constante par rapport au vent apparent tout au long de l'envergure de la pale. Pour simplifier le dessin de la pale et son réglage, on prend le bout de pale comme référence (0°) pour le vrillage. Voici les résultats obtenus:

Tableau 3: Angle du vrillage en fonction de l'envergure

Pourcentage du rayon	Rayon de la pale (cm)	Vitesse de la pale à vide (m/s)	Vitesse pale en charge (m/s)	Angle du vent apparent en °	Vrillage de la pale en °	Vitesse du Vent apparent (m/s)
100%	300,00	56,4	37,8	12,0	0,0	38,6
95%	285,00	53,6	35,9	12,6	0,6	36,8
90%	270,00	50,8	34,0	13,3	1,3	34,9
85%	255,00	47,9	32,1	14,1	2,0	33,1
80%	240,00	45,1	30,2	14,9	2,9	31,3
75%	225,00	42,3	28,3	15,9	3,8	29,5
70%	210,00	39,5	26,4	16,9	4,9	27,6
65%	195,00	36,7	24,6	18,2	6,1	25,8
60%	180,00	33,8	22,7	19,6	7,5	24,1
55%	165,00	31,0	20,8	21,2	9,2	22,3
50%	150,00	28,2	18,9	23,1	11,1	20,5
45%	135,00	25,4	17,0	25,4	13,3	18,8
40%	120,00	22,6	15,1	28,1	16,0	17,1
35%	105,00	19,7	13,2	31,3	19,3	15,5
30%	90,00	16,9	11,3	35,4	23,4	13,9
25%	75,00	14,1	9,4	40,5	28,4	12,4
20%	60,00	11,3	7,6	46,8	34,8	11,0
15%	45,00	8,5	5,7	54,9	42,8	9,8
10%	30,00	5,6	3,8	64,9	52,8	8,9

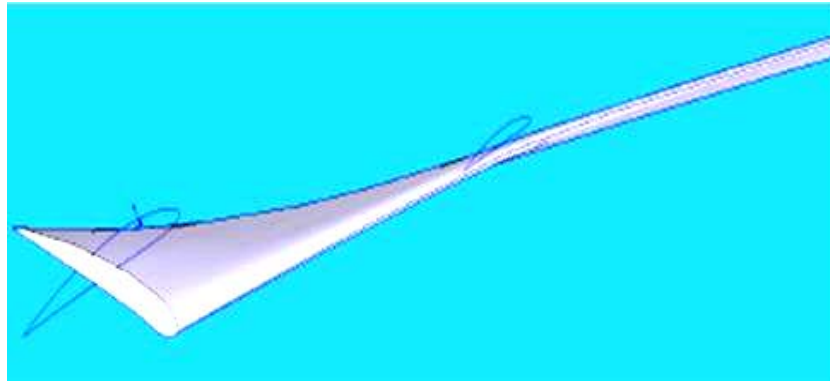


Fig. 4: Modèle 3D de la pale vrillée

4. VERIFICATION DE LA PALE

Une pale peut être simulée à une poutre encastree. Les différentes sollicitations appliquées imposent sa vérification par l'étude statique, dynamique, fréquentielle,. Le modèle 3D crée à partir des différents tableaux sert à l'application des différents chargements.

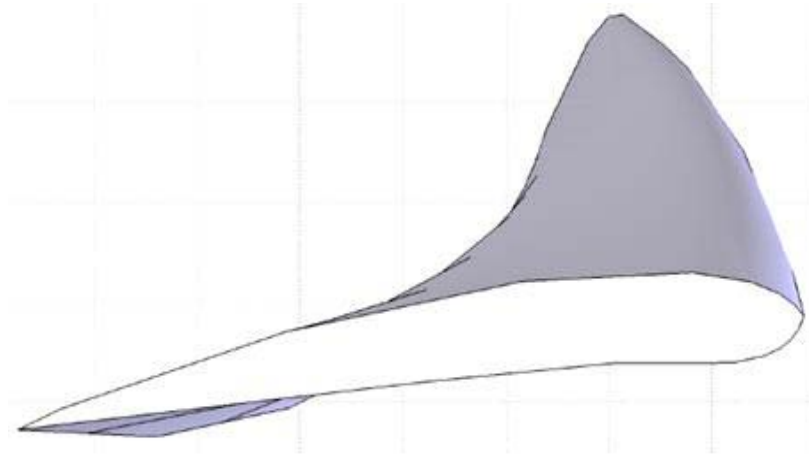


Fig. 5: Une autre vue du modèle 3D de la pale trouvée

4.1 Résultats de l'étude statique

4.1.1 Propriétés

Matière: Alliage 7079; Module d'élasticité longitudinal: $E = 7.2e+010 \text{ N/m}^2$; Module d'élasticité transversal: $G = 2.7e+010 \text{ N/m}^2$; Masse volumique: 2700 kg/m^3 ; Masse de la pale: $m = 2.07621 \text{ kg}$; Volume de la pale: $V = 0.000768966 \text{ m}^3$; Maillage utilisé: volumique (Fig. 6); Taille de l'élément: 9.1069 mm ; Nombre d'éléments: 9668; Nombre de noeuds: 3452.

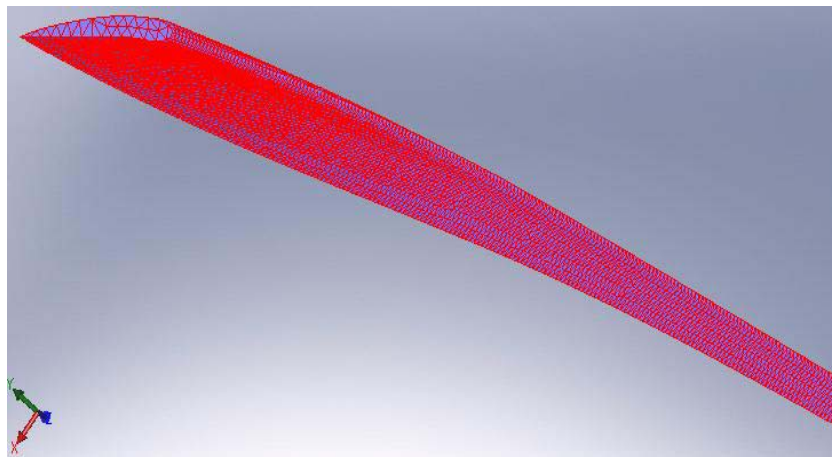


Fig. 6: Pale maillée

4.1.2 Chargement

Les figures suivantes montrent les charges appliquées et les valeurs des contraintes (Fig. 7), les déformations (Fig. 8) et les déplacements (Fig. 9).

4.1.2.1 Contraintes

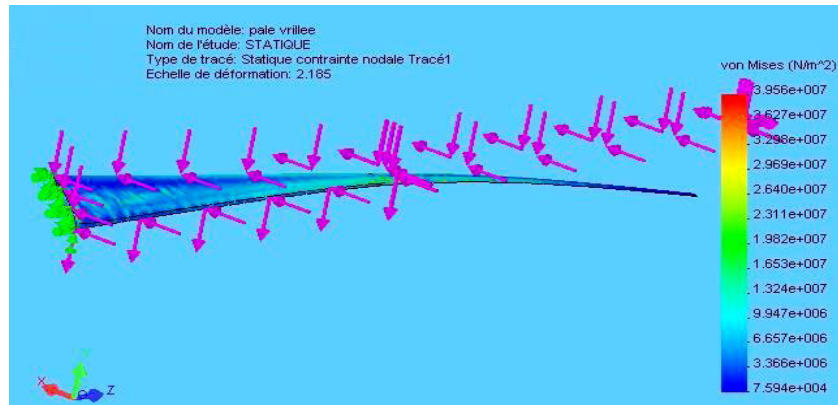


Fig. 7: Distribution des contraintes

4.1.2.2 Déformations

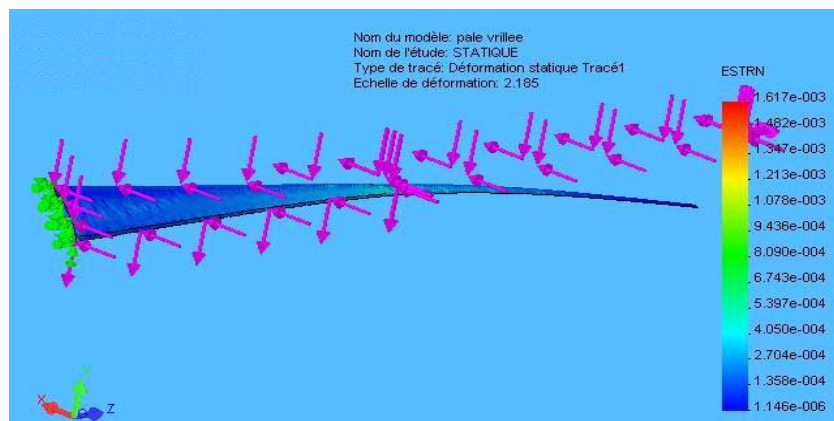


Fig. 8: Distribution des déformations

4.1.2.3 Déplacements

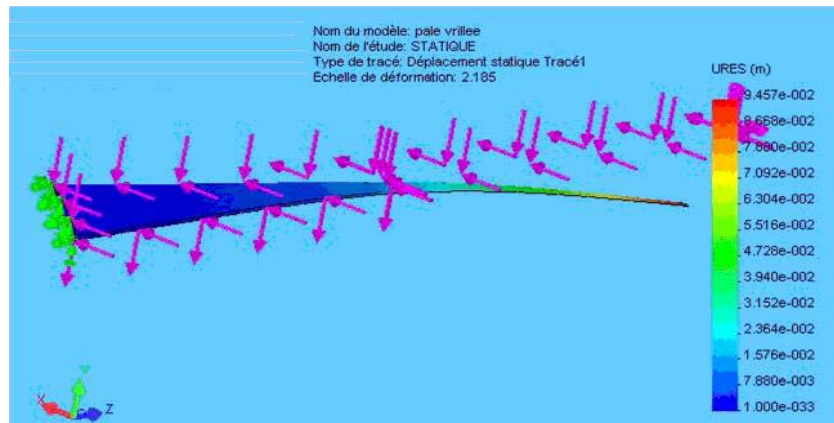


Fig. 9: Distribution des déplacements

4.1.2.4 Discussion

Les valeurs des contraintes représentées par la figure 7 montrent que la pale est un peu plus chargée au milieu qu'aux extrémités, mais elle est loin d'être cassée. La figure 8 montre que la pale subit des déplacements accentués un peu plus au milieu. Ceci est confirmé par la loi de Hook. La figure 9 montre que la valeur de déplacement maximum est à l'extrémité, ceci est raisonnable.

5. CONCLUSION

La conception, le calcul et la réalisation de l'hélice d'une éolienne destinée à fournir une puissance électrique bien déterminée est une tâche qui demande plusieurs disciplines, à savoir: l'aérodynamique, la conception, le calcul, le choix des éléments de machines et l'électricité,...

Pour ces raisons, nous avons utilisé les codes de modélisation et de calcul aérodynamique de la pale et du rotor. Après avoir déterminé le diamètre du rotor et le profil de la pale, on a créé le modèle 3D de la pale, grâce à un autre code de conception des pièces, la vérification et l'analyse des contraintes, des déformations et des déplacements ont été assurées par un autre code de calcul. Cette partie nous a donné la fréquence de rotation à charge du rotor. Comme ce dernier doit être accouplé au multiplicateur de vitesse, le nombre de tours du rotor et son couple représentent les données de départ pour le calcul du multiplicateur.

Pour la conception du multiplicateur et le calcul de ses différents organes, la fréquence de rotation à la sortie doit être dictée par le nombre de tours nécessaire à la génératrice. Cette partie a été faite par un autre code de calcul.

Comme nous voulons que cette contribution soit un guide pour ceux qui veulent réaliser leurs propres hélices d'éoliennes, nous citons les démarches à suivre:

Selon la carte du vent, on choisit le site éolien. Grâce au code de calcul aérodynamique, on cherche le diamètre du rotor et la vitesse du vent suffisant pour convertir l'énergie éolienne en énergie mécanique puis en puissance électrique désirée, ensuite on cherche les profils des différentes sections de la pale à réaliser.

La vérification du rotor contre les différentes sollicitations est nécessaire.

Dans ce genre de travail, les vérifications de la pale par les études: fréquentielle, au flambement et à la fatigue doivent être complétées. Finalement, nous espérons avoir fait une synthèse pour ceux qui veulent réaliser l'hélice de leurs éoliennes dont la puissance électrique demandée est connue.

NOMENCLATURE

(Air atmosphérique sec, environ: $1,23 \text{ kg/m}^3$ à $15 \text{ }^\circ\text{C}$ et à pression atmosphérique $1,0132 \text{ bar}$); ρ : Masse volumique de l'air [kg/m^3]; V : Vitesse du vent [m/s]; D_r : Diamètre du rotor [m]; d_m : Diamètre du moyeu [m].

REFERENCES

- [1] M. Huart, Cours ENER002, '*Energies non Conventionnelles*', Bruxelles, Oct. 2005 Faculté des Sciences Appliquées de l'ULB.
- [2] Liuchen Chang, IEEE Canadian Review, Summer / August 2002.
- [3] P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyl, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 4 640 – 1.