



- André FERRAND

Exemple de calcul de rotor réalisé par des
d'étudiants

PROJET EOLIENNE

I. Cahier des charges et calculs préliminaires

Cahier des charges

Le projet consiste en la conception d'une éolienne de classe II. Nous allons donc nous occuper de la conception et du dimensionnement des différentes parties de l'éolienne.

Le cahier des charges est le suivante :

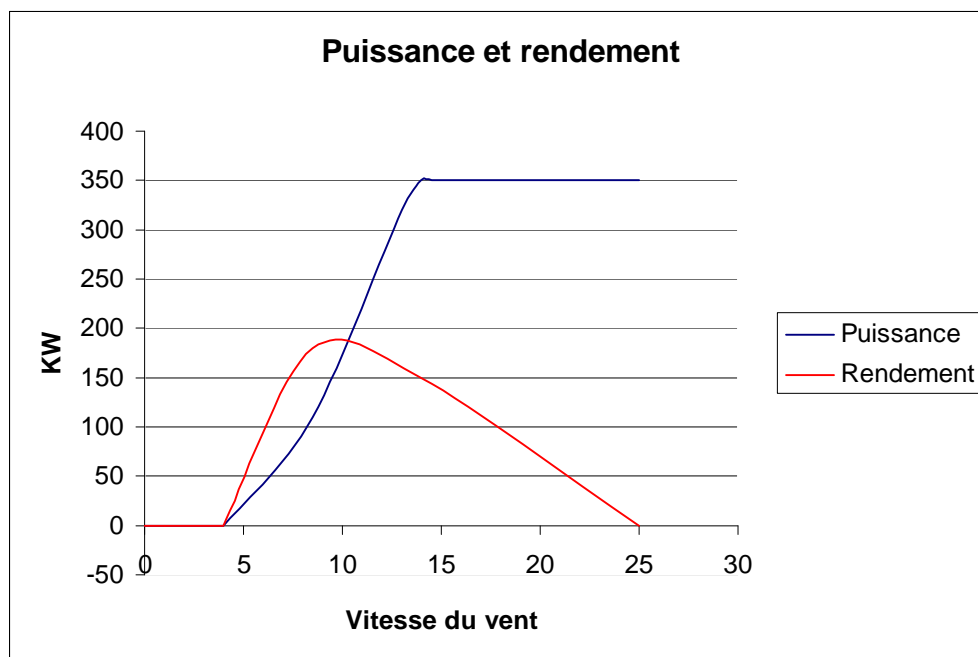
- Puissance nominale 350 KW.
- Vitesse moyenne du vent 8,5 m/s.

Les caractéristiques du vent de la zone sur laquelle sera placée l'éolienne sont les suivantes :

Norme GL	
Vitesse moyenne	8,5 m/s
Rafale sur 50ans	55,3 m/s
Vent établi sur 50 ans	39,5 m/s

Norme IEC	
Vitesse moyenne	8,5 m/s
Rafale sur 50ans	59,5 m/s
Vent établi sur 50 ans	42,5 m/s

La puissance de 350 kw est obtenue pour des vitesses de vent pour lesquelles le rendement est dégradé. Nous allons rechercher la puissance pour laquelle le rendement doit être le meilleur. Le rendement est maxi pour une vitesse de 8,5 m/s. On calcule donc la puissance que l'on obtient avec une vitesse du vent de 8,5 m/s (c'est-à-dire, avec le rendement maximal) :



On estime la courbe de puissance entre 6 m/s et 14 m/s comme une droite et on obtient ainsi pour une vitesse de vent de 8,5 m/s la puissance suivante :

$$P_{8,5\text{m/s}} = 110\text{KW}$$

Nous allons maintenant calculer la surface balayée nécessaire pour obtenir cette puissance. On utilise la formule qui nous donne la puissance contenue dans la veine d'air :

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

Mais il nous faut aussi tenir compte de la limite de Betz, car il est impossible de récupérer la totalité de la puissance contenue dans la veine d'air. Il faut prendre en compte le coefficient C_p :

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho S V^3$$

avec

$$C_{p_{\max i}} = \frac{16}{27}$$

$$\rho = 1,225 \text{ kg / m}^3$$

$S = \text{surface balayée}$

Les différents rendements des organes mécaniques sont :

$$\eta_{\text{mécanique}} = 0,99$$

$$\eta_{\text{alternateur}} = 0,97$$

$$\eta_{\text{multiplicateur}} = 0,96$$

$$\eta_{\text{hélice}} = 0,85$$

Alors, en prenant en compte les rendements, on obtient la surface nécessaire, et donc le rayon d'envergure d'une pale nécessaire pour capter une puissance suffisante dans la veine d'air :

$$S = 630\text{m}^2 \Rightarrow \text{Rayon} = 14\text{m}$$

Pour trouver la vitesse de rotation de l'hélice on définit un coefficient $\lambda = 7$ (cette valeur nous permet d'obtenir le C_p le plus grand) :

$$\Omega = \frac{\lambda \cdot V}{R} = 4,25 \text{ rad / seg} = 40,6 \text{ tr / min}$$

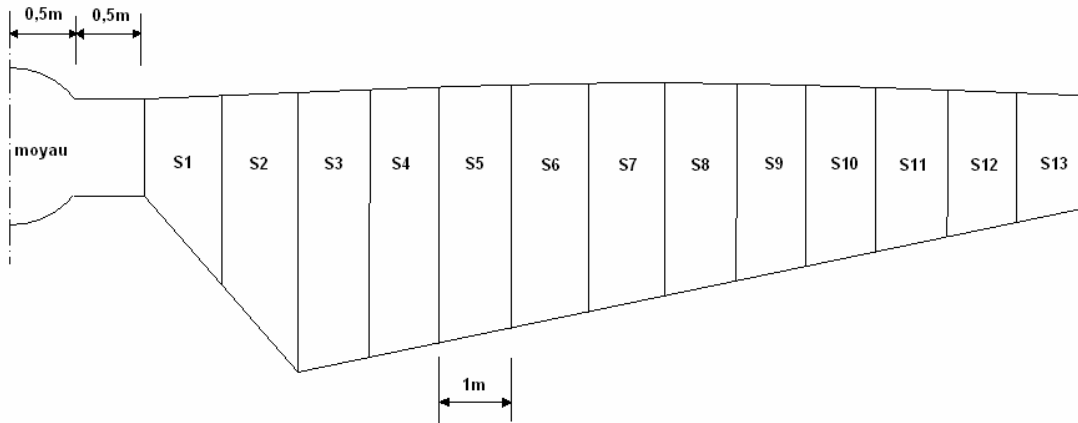
La fréquence de rotation de l'alternateur étant de 1500tr/min, nous pouvons obtenir le rapport de multiplication :

$$\frac{1500}{40,6} = 36,94$$

Donc le rapport de multiplication est de 37 environ.

II. Détermination de l'hélice

Tout d'abord nous divisons la pale en 13 sections de 1m de largeur (sans le moyeu), comme on peut voir ci-dessous, pour une longueur totale de 14m :



On se base sur la théorie simplifiée des éoliennes. Tout d'abord on détermine les valeurs des angles de calage et d'incidence, ainsi que les valeurs des coefficients C_z , C_x et la valeur de la corde, (il faut choisir un profil).

Les tableaux ci-dessous résument l'ensemble des résultats obtenus.

r/R	a	V hélice (m/s)	V tangentielle (m/s)	$\tan(l)$	l (rad)	l (°)	i (°)
0,1	0,33	5,67	5,95	0,95	0,76	43,60	12,32
0,2	0,33	5,67	11,9	0,48	0,44	25,46	11,88
0,3	0,33	5,67	17,85	0,32	0,31	17,61	11,45
0,4	0,33	5,67	23,8	0,24	0,23	13,39	11,01
0,5	0,33	5,67	29,75	0,19	0,19	10,78	10,58
0,6	0,33	5,67	35,7	0,16	0,16	9,02	10,14
0,7	0,33	5,67	41,65	0,14	0,14	7,75	9,71
0,8	0,33	5,67	47,6	0,12	0,12	6,79	9,27
0,9	0,33	5,67	53,55	0,11	0,11	6,04	8,84
1	0,33	5,67	59,5	0,10	0,09	5,44	8,40
0,25	0,33	5,67	14,875	0,38	0,36	20,85	11,66
0,32	0,33	5,67	19,125	0,30	0,29	16,50	11,35
0,39	0,33	5,67	23,375	0,24	0,24	13,63	11,04
0,46	0,33	5,67	27,625	0,21	0,20	11,59	10,73
0,53	0,33	5,67	31,875	0,18	0,18	10,08	10,42
0,60	0,33	5,67	36,125	0,16	0,16	8,91	10,11
0,67	0,33	5,67	40,375	0,14	0,14	7,99	9,80
0,75	0,33	5,67	44,625	0,13	0,13	7,24	9,49
0,82	0,33	5,67	48,875	0,12	0,12	6,61	9,18
0,89	0,33	5,67	53,125	0,11	0,11	6,09	8,87
0,96	0,33	5,67	57,375	0,10	0,10	5,64	8,56

Remarque : pour calculer l'angle "i" (angle entre la direction du vent et la corde) :

$$i = 12,25 - k \cdot r/R$$

Le coefficient $k=4,35$ a été obtenu en utilisant le solveur Excel, de façon à obtenir :

$$f = C_z / C_x \text{ de l'ordre de } 100. \text{ Nous avons ainsi une finesse en bout de pale maximale.}$$

Pour le calcul de la corde on se basera sur :

$$C_z p l = \frac{16 \Pi R}{9 \cdot \lambda \sqrt{\lambda^2 \frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}}}$$

r/R	alpha calage (°)	Cz	Cx	Cz/Cx	Cz.p.l/r	corde l (m)
0,10	31,29	1,447	0,032	45,60	8,25	2,66
0,20	13,58	1,416	0,028	49,79	2,57	1,30
0,30	6,17	1,377	0,025	55,53	1,21	1,23
0,40	2,38	1,332	0,014	94,82	0,69	0,97
0,50	0,21	1,279	0,013	95,42	0,45	0,82
0,60	-1,12	1,220	0,013	95,90	0,31	0,72
0,70	-1,96	1,168	0,012	96,10	0,23	0,64
0,80	-2,48	1,120	0,012	96,09	0,18	0,59
0,90	-2,79	1,072	0,011	95,87	0,14	0,55
1,00	-2,96	1,024	0,011	95,39	0,11	0,52
0,25	9,19	1,397	0,015	93,88	1,70	1,42
0,32	5,15	1,368	0,015	94,32	1,06	1,16
0,39	2,59	1,335	0,014	94,77	0,72	0,99
0,46	0,86	1,299	0,014	95,21	0,52	0,86
0,54	-0,34	1,259	0,013	95,61	0,39	0,78
0,61	-1,19	1,215	0,013	95,92	0,31	0,71
0,68	-1,81	1,178	0,012	96,08	0,25	0,66
0,75	-2,25	1,144	0,012	96,12	0,20	0,62
0,82	-2,56	1,109	0,012	96,06	0,17	0,58
0,89	-2,78	1,075	0,011	95,89	0,14	0,55
0,96	-2,91	1,041	0,011	95,59	0,12	0,53

Remarque : l'angle de calage prend une valeur beaucoup trop importante au pied de la pale, c'est pourquoi nous le limitons à 10°-15° pour ne pas avoir la pale trop vrillée, surtout qu'au niveau du pied de pale, nous privilégions la résistance de la pale plutôt que son efficacité aérodynamique.

Maintenant il faut calculer les efforts que subit chaque pale. Pour cela on calcule les moments fléchissant qui s'appliquent sur chaque section de pale. Puis nous sommions l'ensemble des moments que subit chaque section de la pale pour obtenir le moment total agissant sur une pale :

	corde	r	i	Cz	Cx	dRz	dRx	dM	Moment fléchissant
S1	0,81	1,50		1,30	0,02	47,07	0,54	48,10	50,56
S2	1,14	2,50		1,30	0,02	131,33	1,52	137,74	294,81
S3	1,42	3,50	11,66	1,40	0,01	308,56	3,29	373,71	1005,13
S4	1,16	4,50	11,35	1,37	0,01	386,67	4,10	476,62	1663,06
S5	0,99	5,50	11,04	1,34	0,01	466,24	4,92	577,86	2485,78
S6	0,86	6,50	10,73	1,30	0,01	546,66	5,74	677,45	3473,28
S7	0,78	7,50	10,42	1,26	0,01	627,58	6,56	775,38	4625,56
S8	0,71	8,50	10,11	1,22	0,01	708,84	7,39	871,65	5942,61
S9	0,66	9,50	9,80	1,18	0,01	790,33	8,23	966,16	7424,42
S10	0,62	10,50	9,49	1,14	0,01	871,99	9,07	1058,90	9070,99
S11	0,58	11,50	9,18	1,11	0,01	953,78	9,93	1149,82	10882,31
S12	0,55	12,50	8,87	1,08	0,01	1035,66	10,80	1238,85	12858,39
S13	0,53	13,50	8,56	1,04	0,01	1117,61	11,69	1325,87	14999,22
								9678Nm	74776 Nm

Vérification :

$$\sum dm \times \sum \eta \times \Omega \times 3 \approx 97 \text{ kW proche des 110 kW calculés précédemment.}$$

Finalement, on calcule le moment fléchissant maxi pour un vent cinquantenaire de 60m/s et la pale à l'arrêt (face au vent, c'est-à-dire, Cx=2) :

	corde	r	Cx	dRz	dRx	Moment Fléchissant max
S1	0,81	1,50	2,00	0,00	1632,95012	2449,425183
S2	1,14	2,50	2,00	0,00	2386,80603	5967,015076
S3	0,00	3,50	2,00	0,00	3174,6659	11111,33065
S4	0,00	4,50	2,00	0,00	2792,62939	12566,83225
S5	0,00	5,50	2,00	0,00	2590,81132	14249,46229
S6	0,00	6,50	2,00	0,00	2500,99826	16256,4887
S7	0,00	7,50	2,00	0,00	2488,27034	18662,02752
S8	0,00	8,50	2,00	0,00	2534,24399	21541,0739
S9	0,00	9,50	2,00	0,00	2607,902	24775,06896
S10	0,00	10,50	2,00	0,00	2706,56409	28418,92289
S11	0,00	11,50	2,00	0,00	2832,93718	32578,77761
S12	0,00	12,50	2,00	0,00	2984,44525	37305,56563
S13	0,00	13,50	2,00	0,00	3159,72467	42656,28311
						268538Nm

Ce moment sera le moment fléchissant maxi que devra être capable de supporter la pale.

Cela suffit pour le prédimensionnement, mais pour un vrai calcul il faut suivre la norme