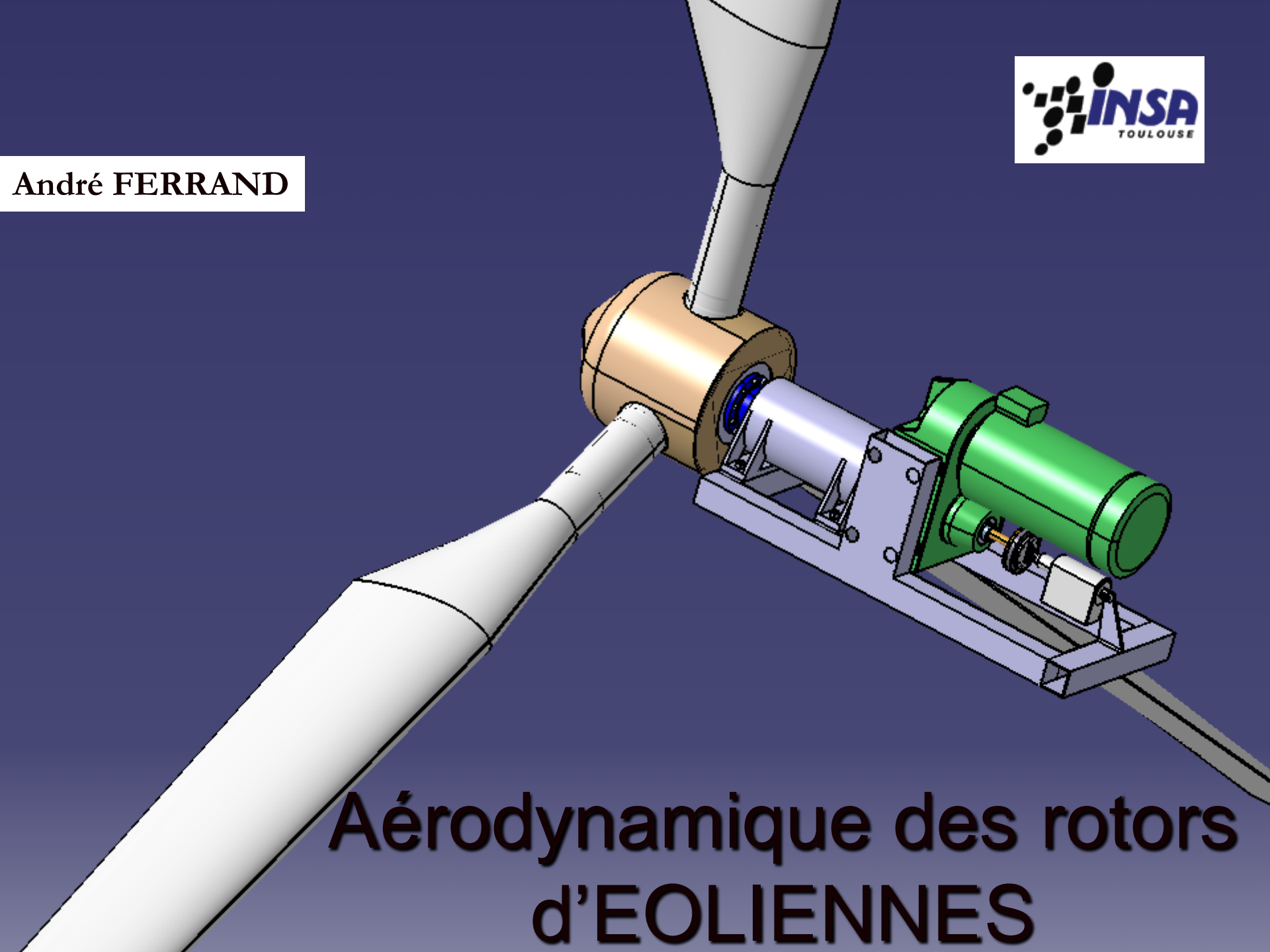


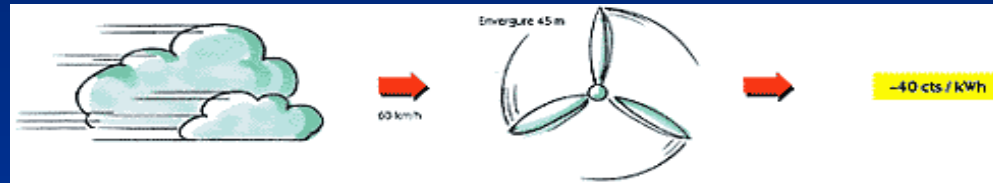
André FERRAND



Aérodynamique des rotors d'EOLIENNES

L'ENERGIE DU VENT

Éner. Cinétique → Éner. Mécanique → Éner. Électrique



Puissance théorique

- densité de l'air (ρ)
- surface balayée (S)
- vitesse du vent ∞ amont (U)

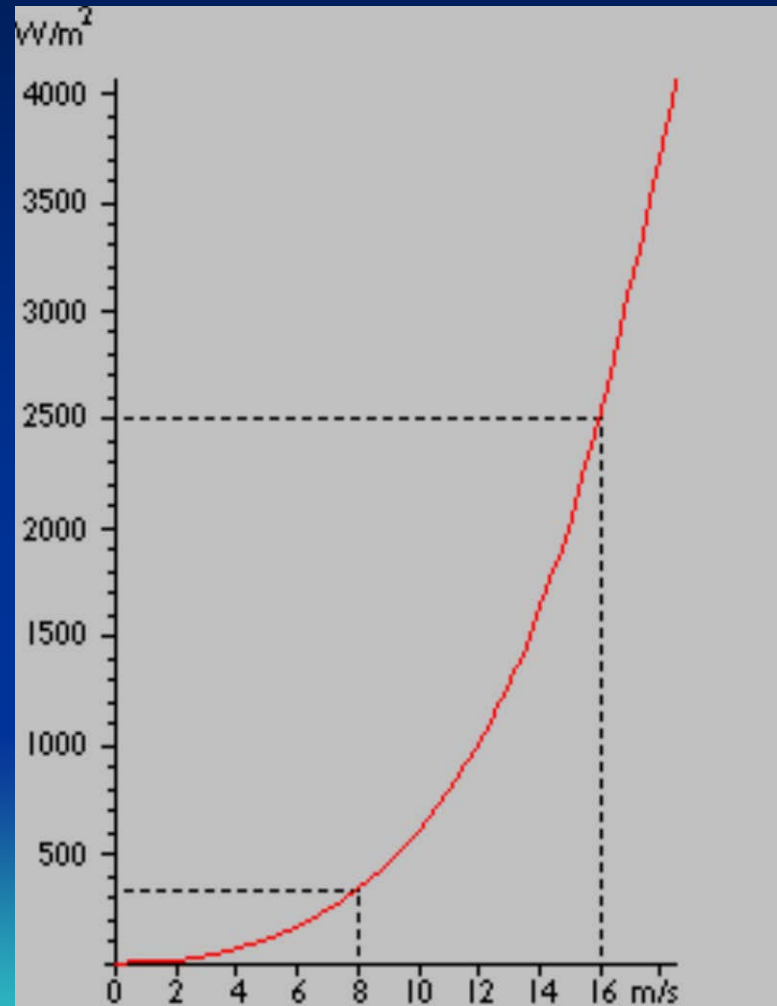
$$P = \frac{1}{2} \rho S U^3$$

Baetz : Puissance maximale
recuperable

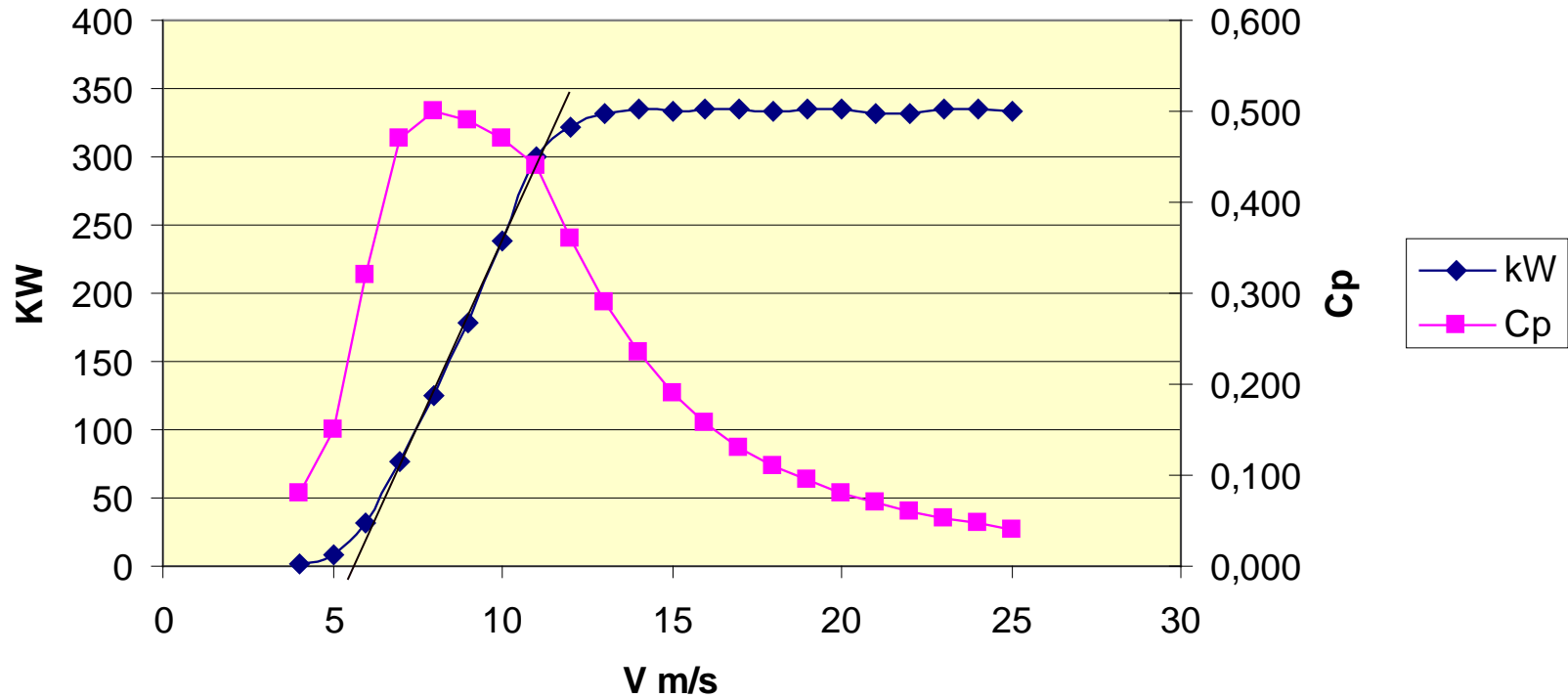


- réduction de la vitesse du vent
- 16/27 (59%) de la puissance du vent

La puissance théorique est proportionnelle à la vitesse du vent au cube



Puissance & rendement



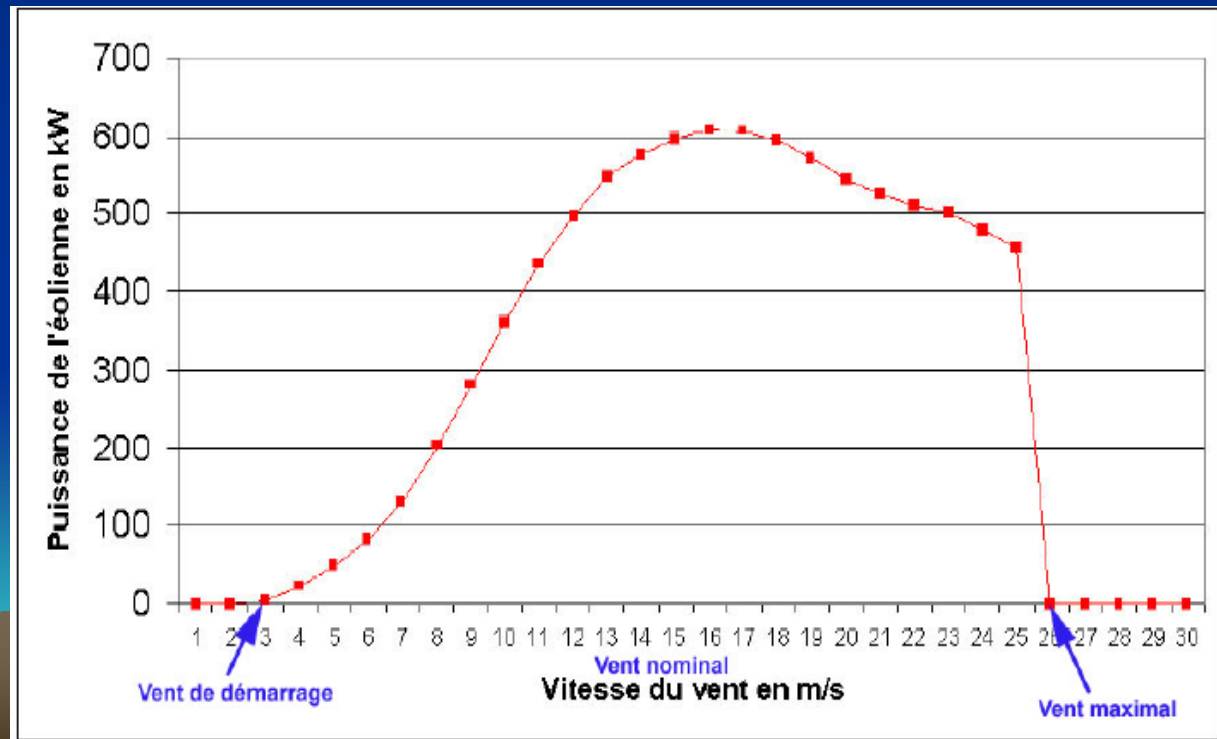
Vitesse de démarrage 3 à 5m/s

Vitesse nominale : 14m/s

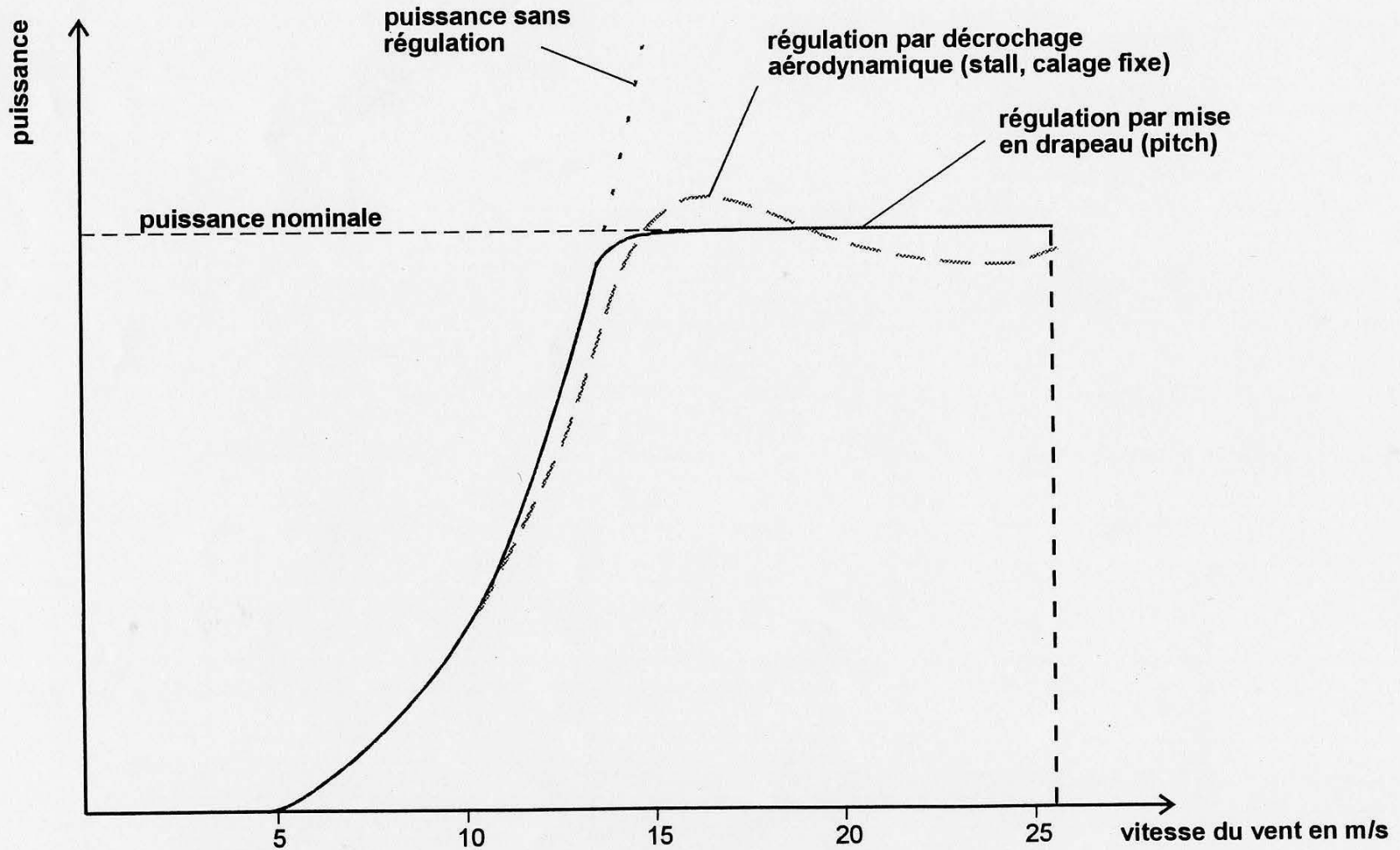
Vitesse d'arrêt : 25 m/s

COURBE DE PUISSANCE

- Puissance de sortie pour différentes vitesses
- Caractéristique principale de l'éolienne



REGULATION DE LA PUISSANCE

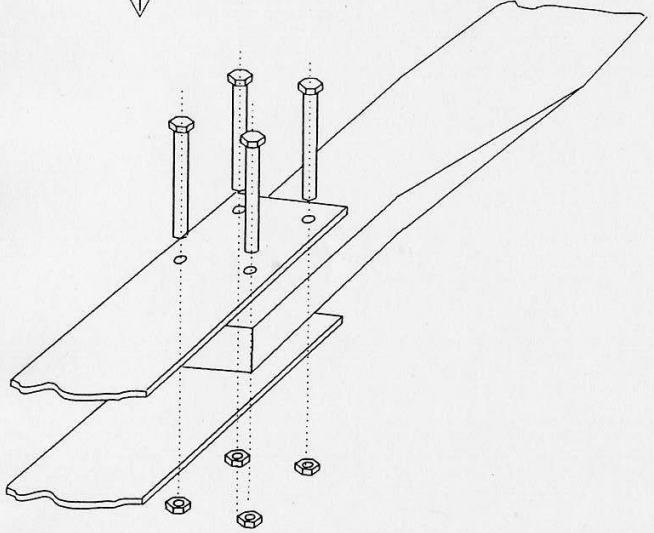
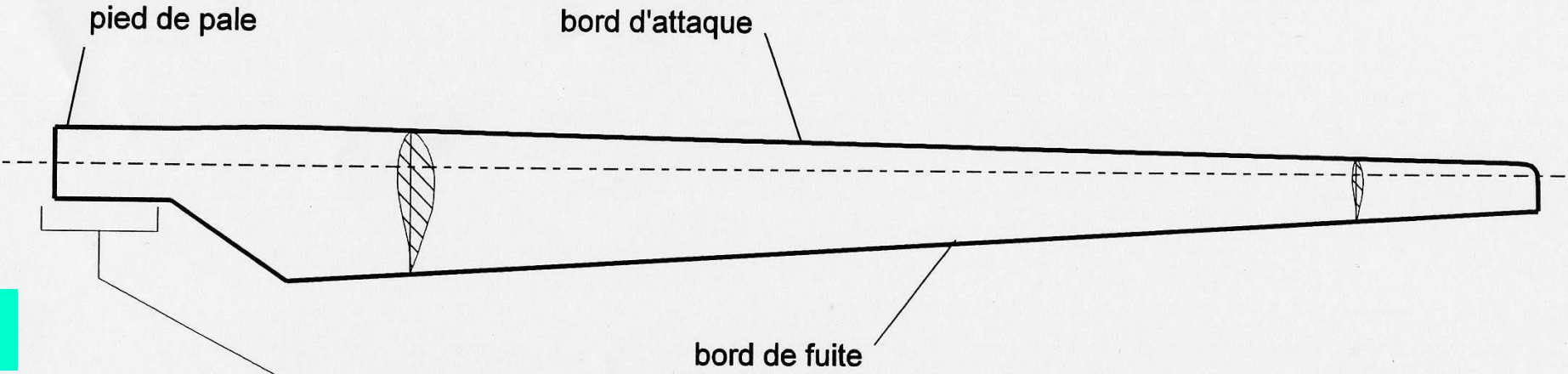


$$C_p^{\max} = \frac{16}{27} \approx 0,593$$

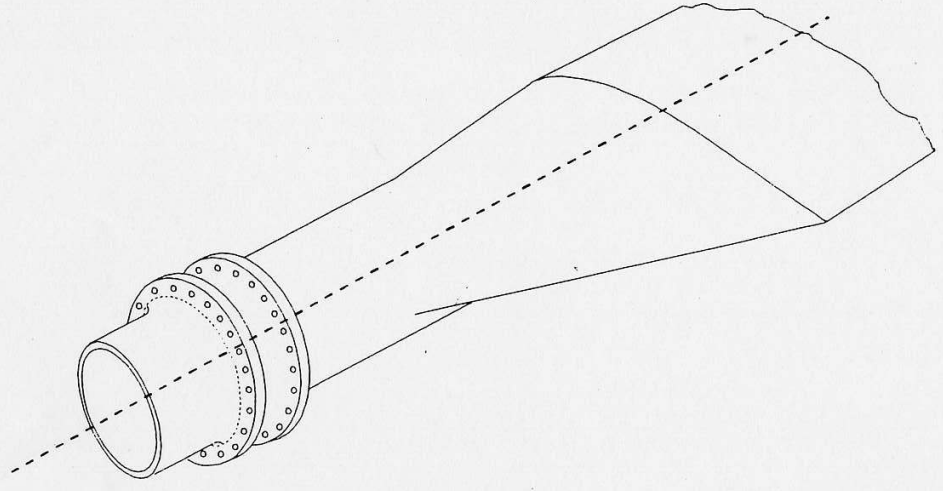
aérodynamique



LA PALE



Fixation par plaque et contre-plaque



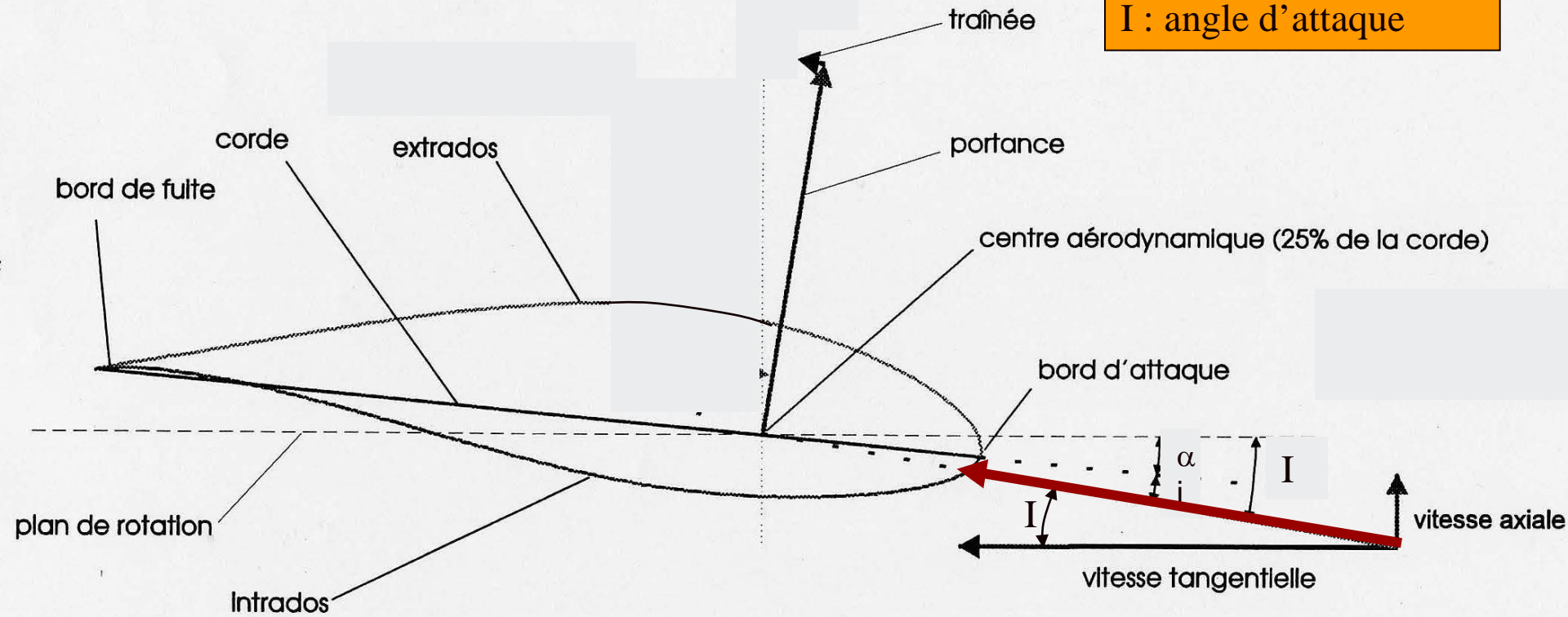
Fixation par bride et contre-bride

Le profil aérodynamique.

i : angle d'incidence

α : angle de calage

I : angle d'attaque

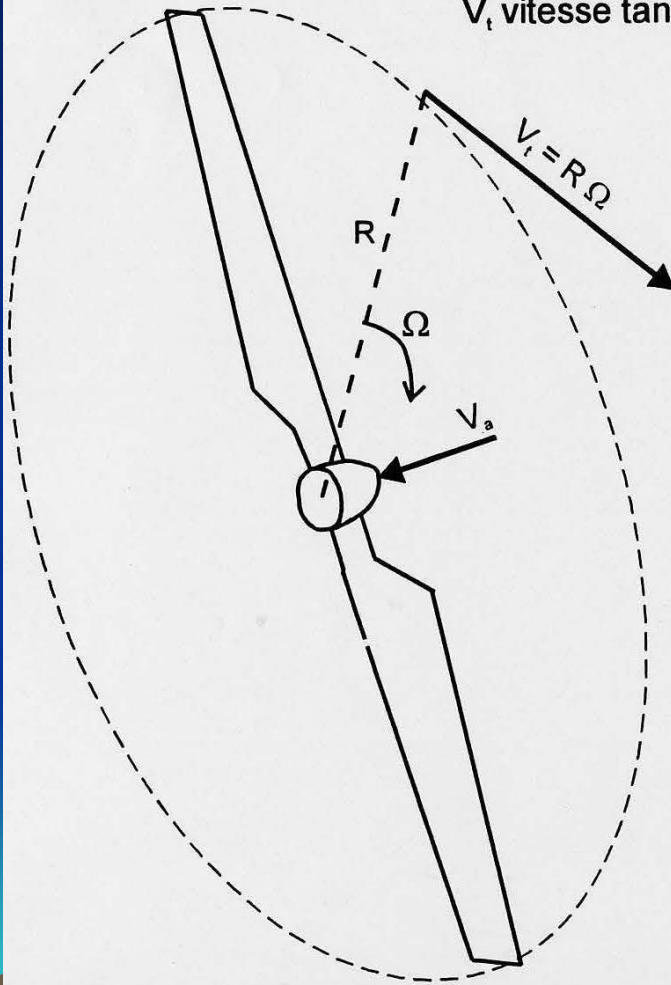


PERFORMANCE D'UNE HELICE, C_p , λ .

Rapport de vitesse périphérique $\lambda = V_t/V_a = \frac{R\Omega}{V_a}$

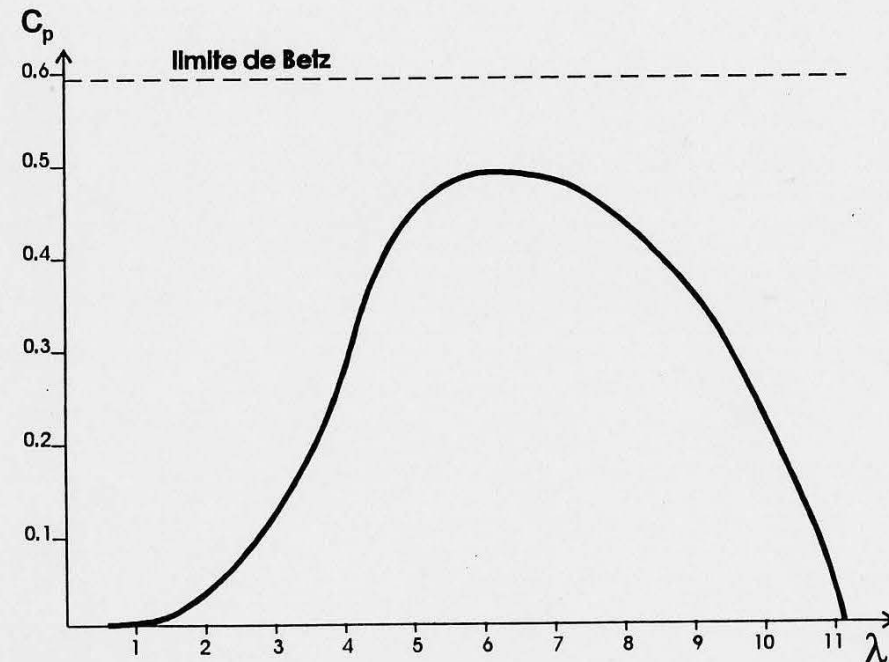
V_a vitesse axiale

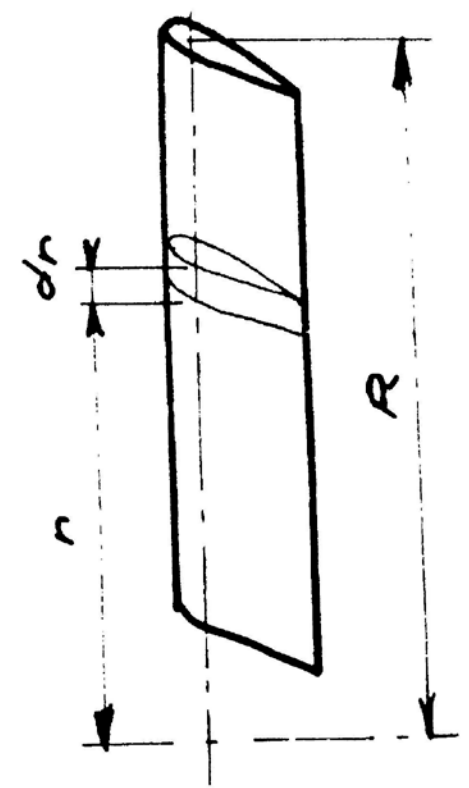
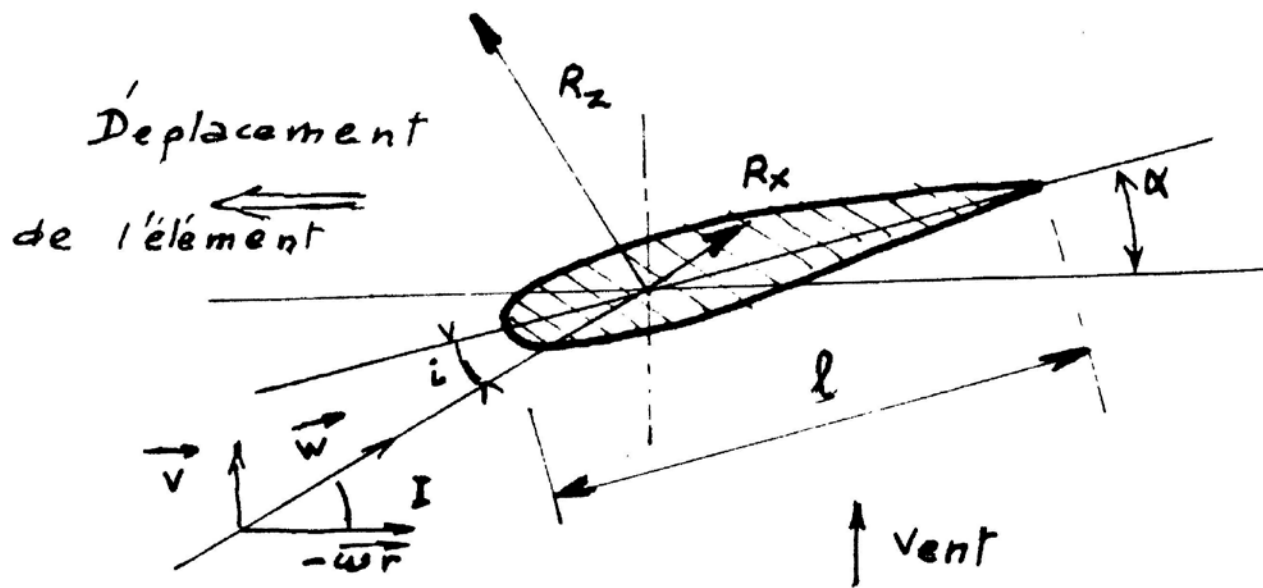
V_t vitesse tangentielle



Coefficient de performance

$$C_p = \frac{P}{0.5 \rho S V^3}$$

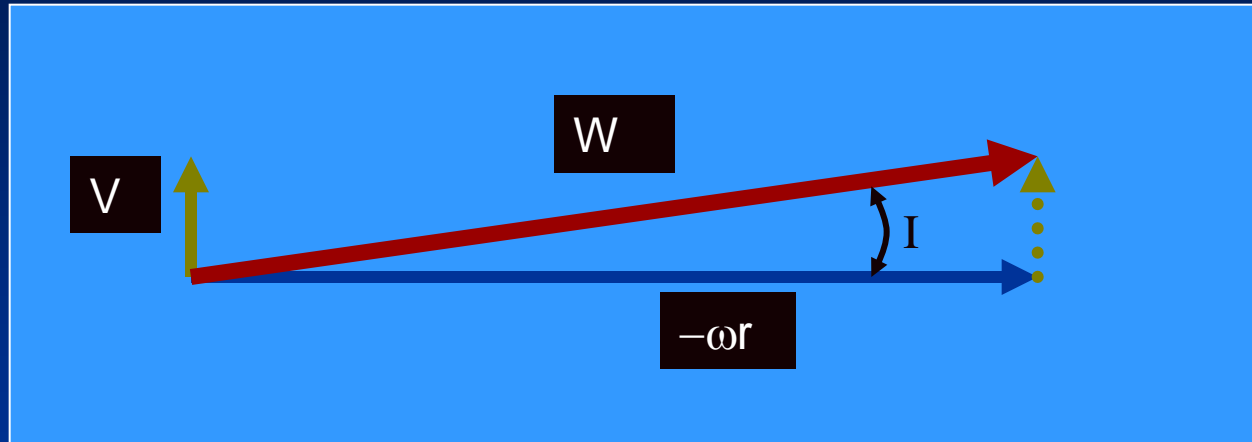




- Forces élémentaires, portance et traînée :
 - $dR_z = \frac{1}{2} C_z W^2 l dr$
 - $dR_x = \frac{1}{2} C_x W^2 l dr$
- Moment moteur élémentaire :
 - $dM = (dR_z \sin I - dR_x \cos I) r$

Le triangle des vitesses

I varie tout le long de la pale, il est mini en bout de pale, maxi en pied



V vitesse du vent sur la pale

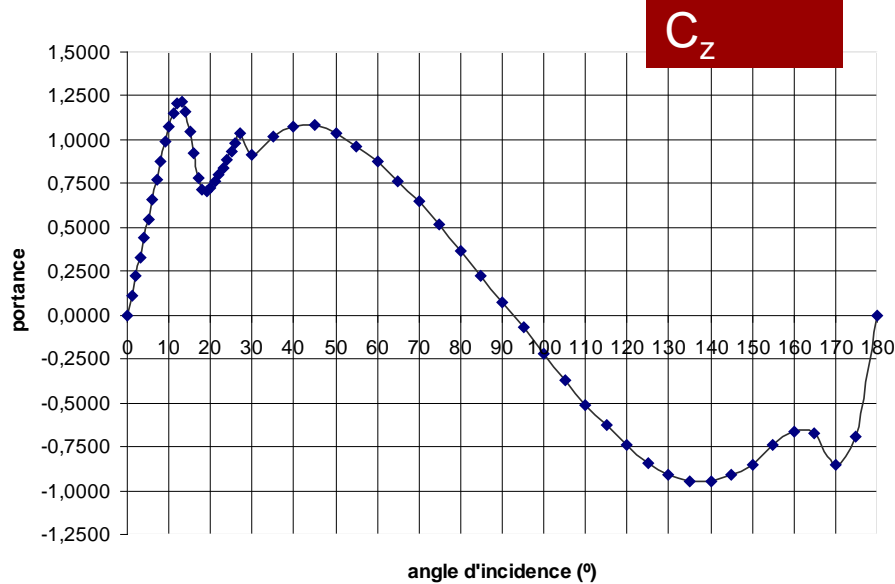
$-\omega r$ vent induit par la rotation de la pale

W vent relatif

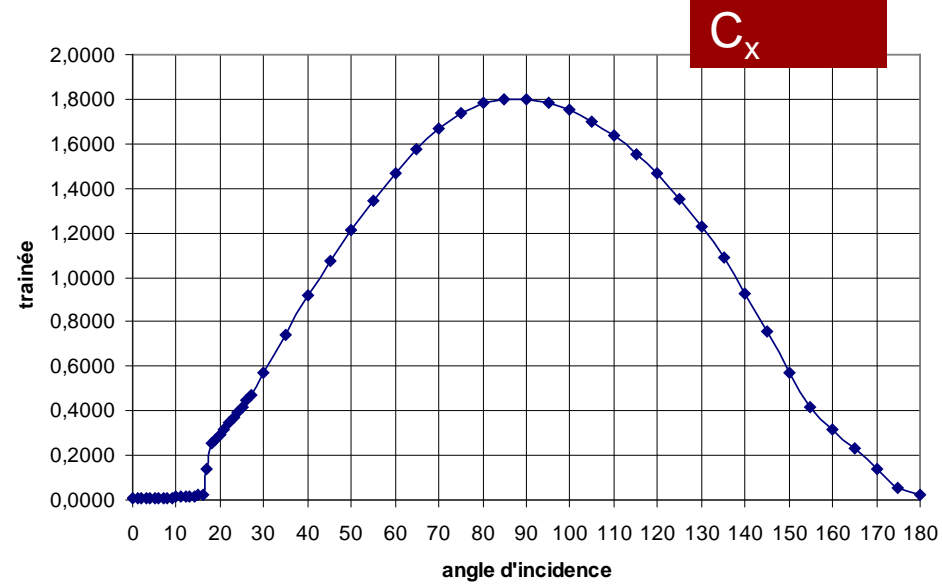
I est l'angle du vent relatif avec le plan de rotation

En bout de pale $\omega r = 7 V$

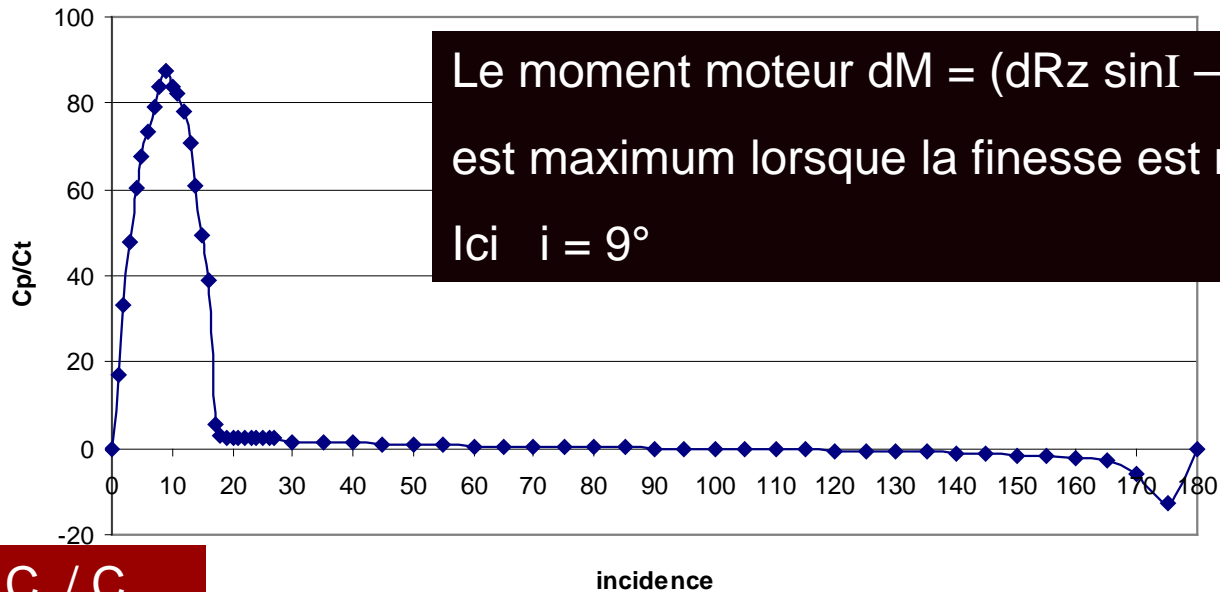
NACA 0012 PORTANCE



NACA 0012 Trainée



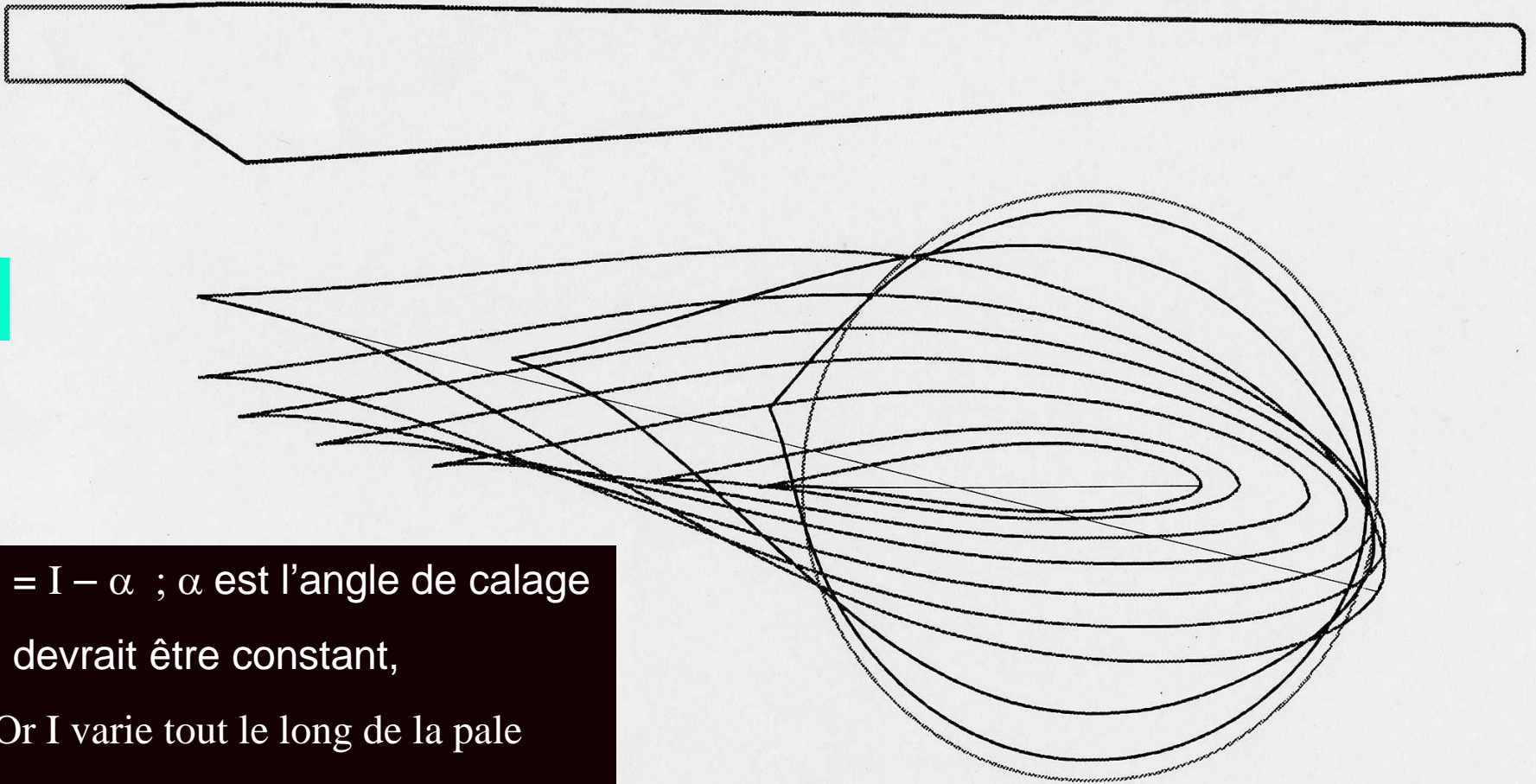
NACA 0012 Portance/trainee ratio



Le moment moteur $dM = (dR_z \sin I - dR_x \cos I) r$
 est maximum lorsque la finesse est maxi
 Ici $i = 9^\circ$

Finesse $f = C_z / C_x$

VUE LONGITUDINALE D'UNE PALE



$i = I - \alpha$; α est l'angle de calage

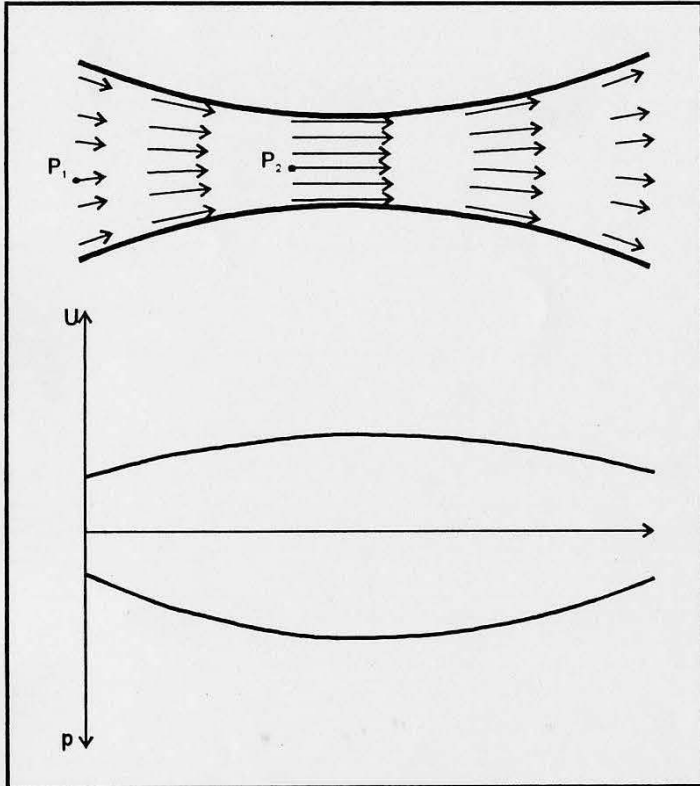
i devrait être constant,

Or I varie tout le long de la pale

=> La pale doit être vrillée

AERODYNAMIQUE

Relation entre vitesse et pression dans un fluide incompressible



Equation de Bernouilli

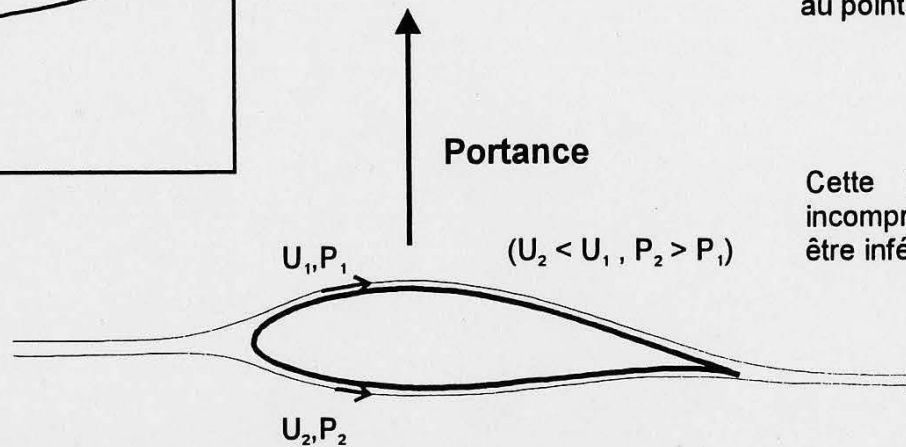
$$H = \frac{1}{2}U^2 + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constante}$$

- H constante de Bernouilli
- U vitesse de l'écoulement
- p pression
- ρ densité de l'air
- g accélération de la pesanteur
- z altitude

L'équation de Bernouilli permet d'établir une relation entre la vitesse et la pression au point P_1 et au point P_2

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}U_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}U_2^2$$

Cette loi est valable pour un liquide incompressible, dans le cas de l'air, U doit être inférieur à 1/3 de la vitesse du son



Conversion de l'énergie du vent.

Théorie de Rankine-Froude = théorème de la quantité de mouvement (Euler) en mécanique des fluides

- $F = M_a (U - V_1) = \rho A V (U - V_1)$ (1)
- Avec F poussée sur le disque éolien (N)
- M_a masse d'air à travers le disque éolien par seconde (Kg/s)
- V vitesse du vent au niveau du disque (m/s)
- A surface du disque
- ρ densité de l'air

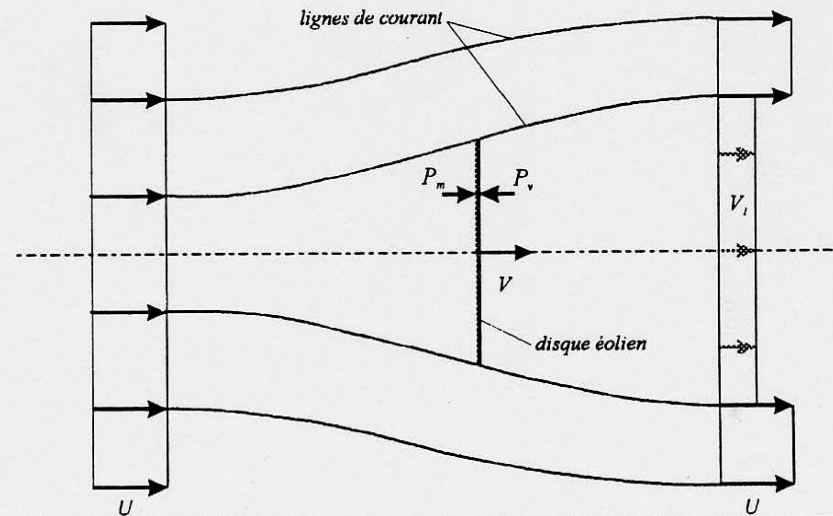


Figure 1.

- de même la différence de pression fournit une seconde relation pour la poussée F :

- $$F = A (p_m - p_v) \quad (2)$$

p_m pression en amont p_v pression en aval

- L'équation de Bernoulli :

- $H = \frac{1}{2} v^2 + p/\rho$ en négligeant l'effet de la gravitation.

- Combiné avec l'équation (2) donne la relation :

- $F = \frac{1}{2} \rho A (U^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} \rho A (U + V_1) (U - V_1)$

- qui avec l'équation (1) donne :

- $$V = \frac{1}{2} (U + V_1)$$

- donc la vitesse du vent au niveau du disque éolien est la moyenne de la vitesse amont et aval.
- Si l'on pose $U - V = aU$
- $U - V_1 = 2aU$
- $V = (1 - a) U$
- a est le **facteur de vitesse induite axial** dont la valeur maximale est 0,5 puisque la vitesse minimale en aval est 0.

Limite de Betz

- La puissance fournie par la masse d'air en mouvement au disque éolien est :

- $$P = FV$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A (U^2 - V_1^2)V = \frac{1}{2} \rho AV(U + V_1)(U - V_1)$$

- $$P = 2 \rho AU^3 a (1 - a)^2$$

- Soit le coefficient de puissance

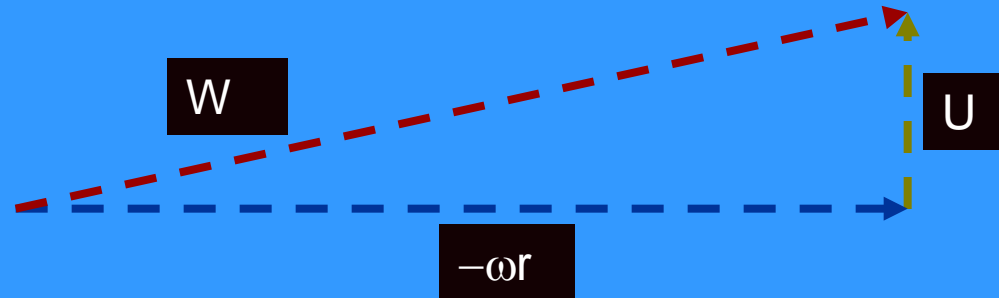
- $$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho AU^3} = 4a (1 - a)^2$$

- La valeur maximale de C_p est atteinte pour $a = 1/3$, donc cette valeur maximale est :

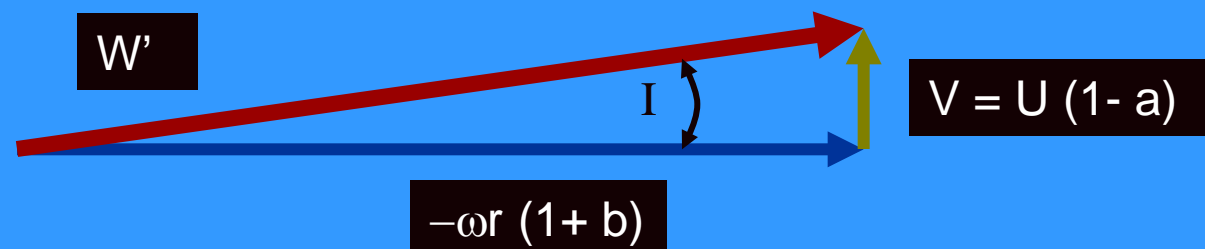
- $$C_{p \max} = (16 / 27) = 0,59$$

- Cette valeur limite est appelée la **limite de Betz**.

Le triangle des vitesses corrigé



La vitesse tangentielle doit également être corrigée



a et b dépendent des conditions de fonctionnement, il faut faire appel à la théorie de Glauert

Calcul de a et b lorsque
l'on s'éloigne du
rendement maxi

$a ; b$

$$I = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a) \cdot U}{(1+b) \cdot \omega \cdot r} \right)$$

$$i = I - \alpha$$

$$C_z = f(i) ; C_x = f(i)$$

$$C_N = C_z \sin I - C_x \cos I$$

$$C_T = C_z \cos I + C_x \sin I$$

$$a' = \frac{p l C_T / 8 \pi r (\sin I)^2}{1 + p l C_T / 8 \pi r (\sin I)^2}$$

$$b' = \frac{p l C_N / 4 \pi r (\sin 2I)^2}{1 - p l C_N / 4 \pi r (\sin 2I)^2}$$

$a=a'$
 $b=b'$

non

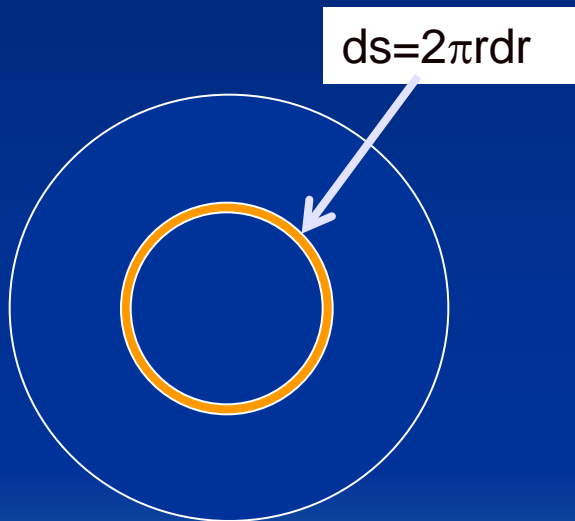
$$|a_{\text{nouveau}} - a_{\text{ancien}}| > \epsilon$$

oui

$a = 1/3$ au
rendement
maxi

Calcul de la corde d'une pale

- Principe : la pression créée sur la surface balayée doit être uniforme (et non pas f_n de r)



$$dF_p = 2 \pi \rho V^2 r dr$$

Th. de la quantité de mouvement

En appliquant les lois de l'aérodynamique :

$$dF_p = \frac{1}{2} \rho W^2 dr \ell_p (C_z \cos l + C_x \sin l)$$

En négligeant la traînée, on obtient;
 p est le nbre de pales

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

Exemple de calcul

r / R	a	V	V tangentielle	tgte I	I angle de vent rd	I en d°	i	calage	Cz	Cz p l / r	corde l
0,1	0,33	5,695	6,0	1,0	0,76	43,75	12,4	31,3	1,45	8,253774	3,79
0,2	0,33	5,695	11,9	0,5	0,45	25,57	12,05	13,5	1,43	2,572717	2,40
0,3	0,33	5,695	17,9	0,3	0,31	17,70	11,7	6,0	1,40	1,207086	1,72
0,4	0,33	5,695	23,8	0,2	0,23	13,46	11,35	2,1	1,37	0,693007	1,35
0,5	0,33	5,695	29,8	0,2	0,19	10,84	11	-0,2	1,31	0,44787	1,14
0,6	0,33	5,695	35,7	0,2	0,16	9,06	10,65	-1,6	1,27	0,312698	0,98
0,7	0,33	5,695	41,7	0,1	0,14	7,79	10,3	-2,5	1,23	0,23049	0,87
0,8	0,33	5,695	47,6	0,1	0,12	6,82	9,95	-3,1	1,19	0,176846	0,79
0,9	0,33	5,695	53,6	0,1	0,11	6,07	9,6	-3,5	1,16	0,139936	0,73
1	0,33	5,695	59,5	0,1	0,10	5,47	9,25	-3,8	1,12	0,113467	0,68

Rayon hélice	20	m
Vitesse vent U	8,5	m/s

coef pour i	3,5	Loi de variation de i = 12,75-coef*r/R
-------------	-----	--

Oméga 2,975 rd/s

r/R	i	Cz	Cx	Cz/Cx
0,1	12,4	1,45	0,03	44,94
0,2	12,05	1,43	0,03	47,99
0,3	11,7	1,40	0,03	51,96
0,4	11,35	1,35	0,01	94,60
0,5	11	1,31	0,01	95,09
0,6	10,65	1,27	0,01	95,50
0,7	10,3	1,23	0,01	95,81
0,8	9,95	1,19	0,01	96,02
0,9	9,6	1,16	0,01	96,12
1	9,25	1,12	0,01	96,09

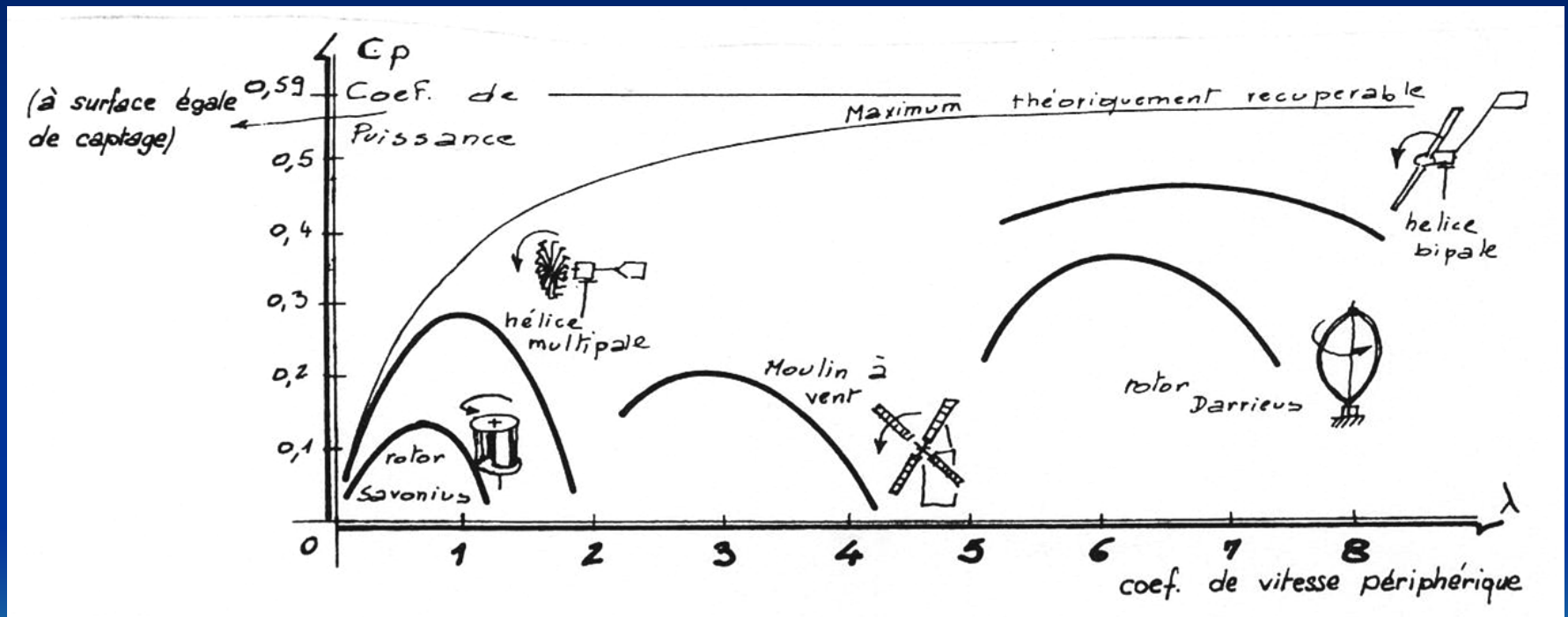
Calcul des efforts au rendement maxi

surface	r/R	bras de levier r	corde	Cz	Cx	I	V tangentielle	dRz	dRx	dM	moment fléchissant	poussée axiale
unités	sans	m	m			rd	m/s	N	N	Nm	Nm	N
S1	0,1	2,5	3,9178	0,5	0,03	0,656	7,4	105	6,32	148	218	87
S2	0,15	3,5	2,8718	0,7	0,03	0,484	10,4	173	7,43	260	549	157
S3	0,2	4,5	2,3039	1,42	0,03	0,386	13,4	424	8,96	681	1781	396
S4	0,25	5,5	1,9419	1,40	0,03	0,323	16,4	500	10,71	815	2624	477
S5	0,3	6,5	1,6888	1,38	0,01	0,278	19,3	580	4,20	1007	3633	559
S6	0,35	7,5	1,5007	1,36	0,01	0,244	22,3	663	4,87	1166	4835	645
S7	0,4	8,5	1,3548	1,34	0,01	0,218	25,3	748	5,58	1329	6216	731
S8	0,45	9,5	1,2379	1,32	0,01	0,197	28,3	833	6,30	1493	7773	818
S9	0,5	10,5	1,1419	1,30	0,01	0,180	31,2	919	7,05	1657	9502	905
S10	0,55	11,5	1,0615	1,28	0,01	0,166	34,2	1004	7,82	1820	11398	991
S11	0,6	12,5	0,9931	1,26	0,01	0,154	37,2	1088	8,61	1982	13457	1077
S12	0,65	13,5	0,934	1,24	0,01	0,144	40,2	1172	9,41	2142	15672	1161
S13	0,7	14,5	0,8825	1,23	0,01	0,135	43,1	1254	10,23	2298	18038	1244
S14	0,75	15,5	0,837	1,21	0,01	0,127	46,1	1335	11,07	2451	20546	1326
S15	0,8	16,5	0,7967	1,19	0,01	0,120	49,1	1414	11,92	2600	23189	1405
S16	0,85	17,5	0,7605	1,17	0,01	0,114	52,1	1492	12,78	2744	25961	1483
S17	0,9	18,5	0,7279	1,15	0,01	0,108	55,0	1567	13,65	2884	28852	1560
S18	0,95	19,5	0,6984	1,13	0,01	0,103	58,0	1641	14,54	3018	31855	1634

30496 total pour une pale 16655
 91489 total pour 3 pales 49966

puissance 272 KW

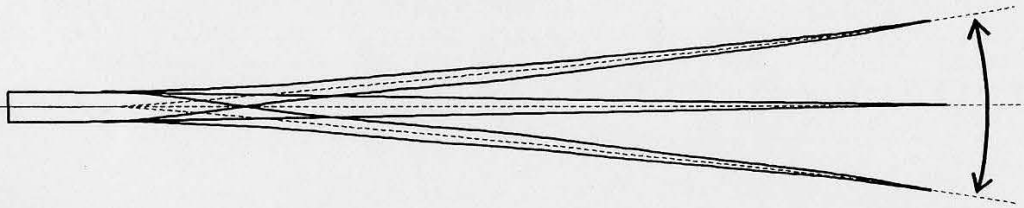
Comparaison des Cp



DYNAMIQUE DE LA PALE

①

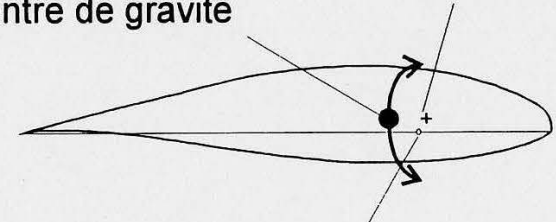
mouvement de battement



②

centre de gravité

centre de torsion



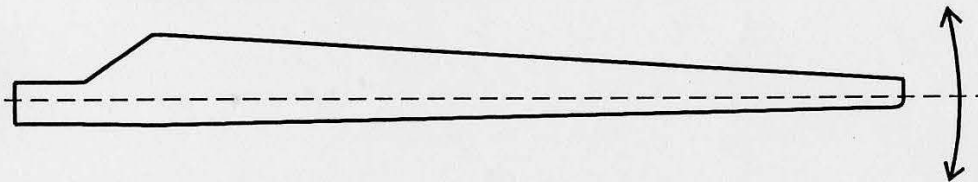
centre aérodynamique

La souplesse et la répartition des masses sur la pale lui permettent d'osciller autour d'une position d'équilibre à des fréquences caractéristiques.

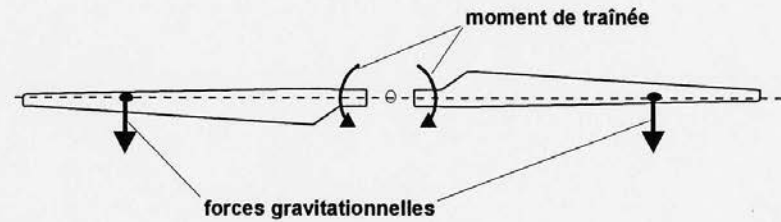
Si la pale est "excitée" par des forces ayant des fréquences voisines de ses fréquences propres il peut se produire des phénomènes de résonance très dangereux pour l'ensemble de l'éolienne.

③

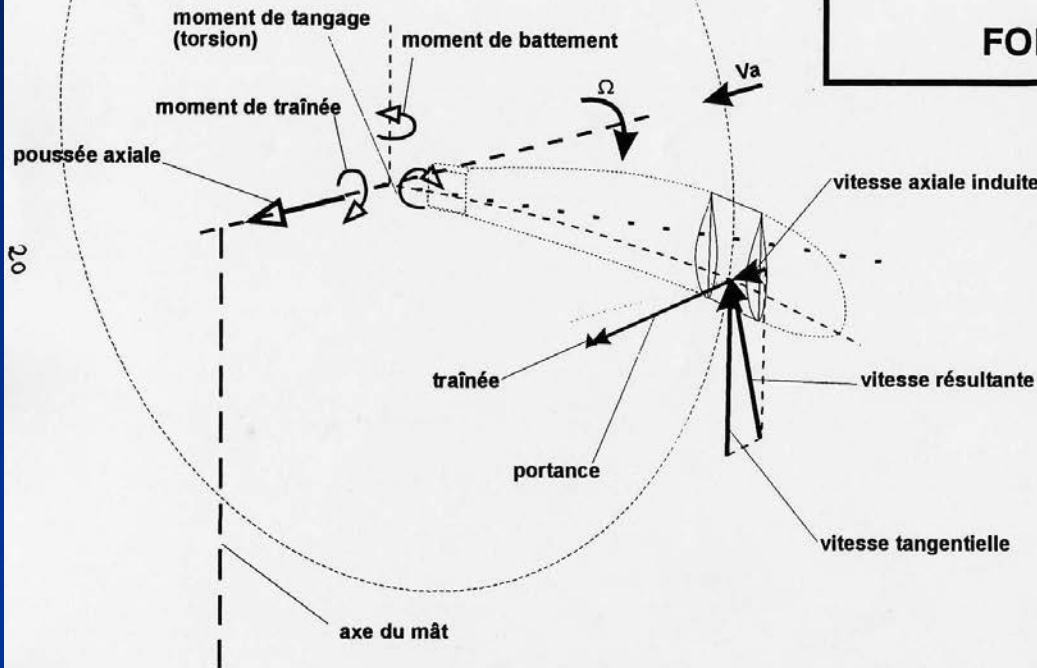
mouvement de traînée



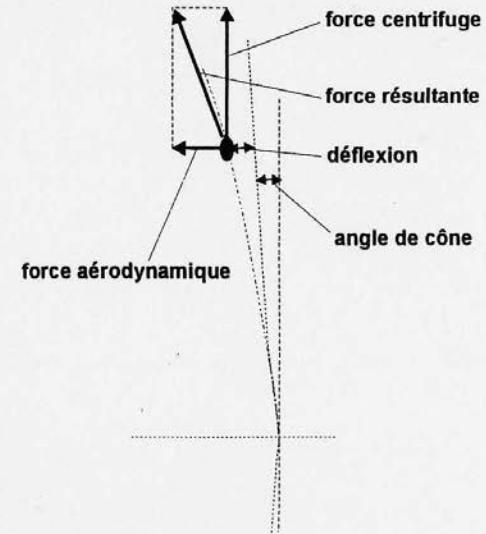
Efforts variables s'exerçant sur la pale



FORCES GRAVITATIONNELLES

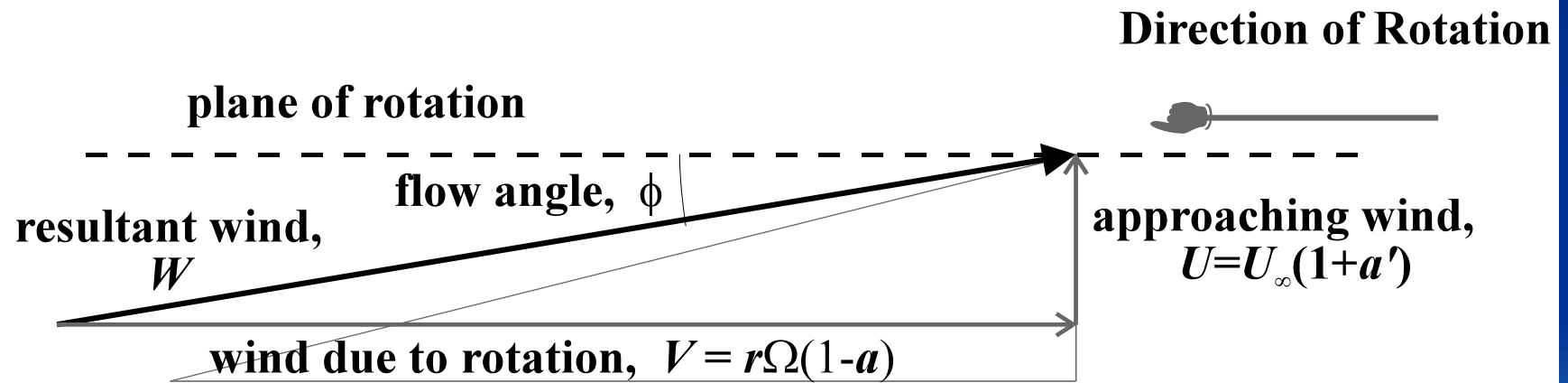


FORCES AERODYNAMIQUES



FORCES CENTRIFUGES

Moment fléchissant 10 fois supérieur au couple moteur



COMPARAISON ENTRE DIFFERENTES TECHNOLOGIES

Durée de vie

Automobile : 4 000 heures
(200 000 kms à 50 km/h)

Avion : 10 000 heures

Aérogénérateur : 150 000 heures
(20 ans x 7500 heures)

nombre de révolutions pour une
éolienne de 15 m de diamètre :

$$100 \text{ tr/mn} \times 60 \times 24 \times 365 \times 20 = 10^9$$

