

DIMENSIONNEMENT D'UN ROTOR D'ÉOLIENNE

Théorie mathématique du dimensionnement d'un rotor d'éolienne à axe horizontal.

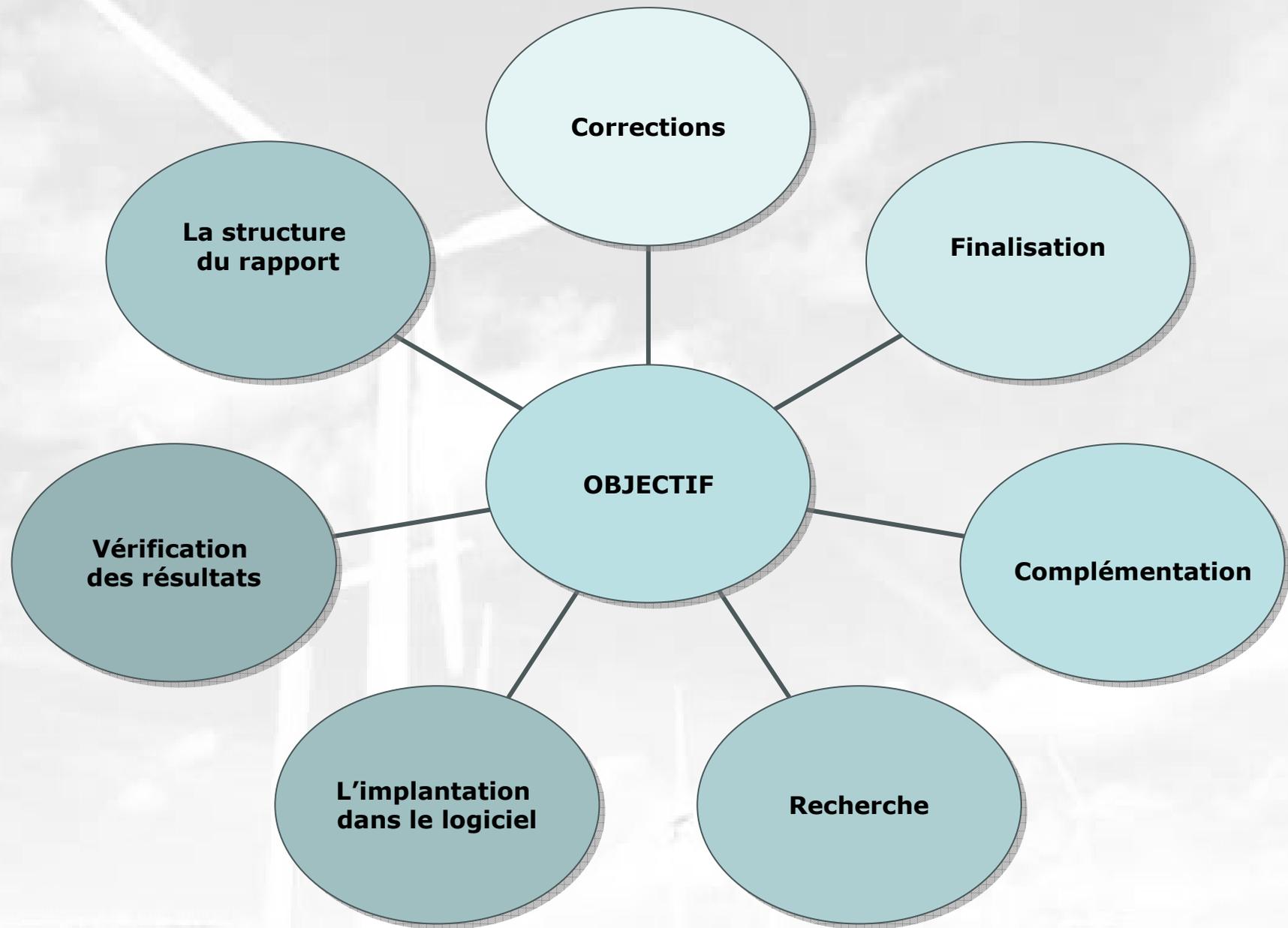
Création d'un logiciel de dimensionnement.

Programmation avec VBA.



TABLE DES MATIÈRES

- Objectif
- CHAPITRE I: L'éolienne et l'énergie éolienne
- CHAPITRE II: Introduction à l'aérodynamique
- CHAPITRE III: Introduction au logiciel
- CHAPITRE IV: Base théorique du logiciel
- CHAPITRE V: Utilisation du logiciel
- Vérification des résultats
- Conclusions et possibles améliorations



CHAPITRE I

L'éolienne et l'énergie éolienne



CHAPITRE I: L'éolienne et l'énergie éolienne

CHAPITRE II: Introduction à l'aérodynamique

CHAPITRE III: Introduction au logiciel

CHAPITRE IV: Base théorique du logiciel

CHAPITRE V: Utilisation du logiciel

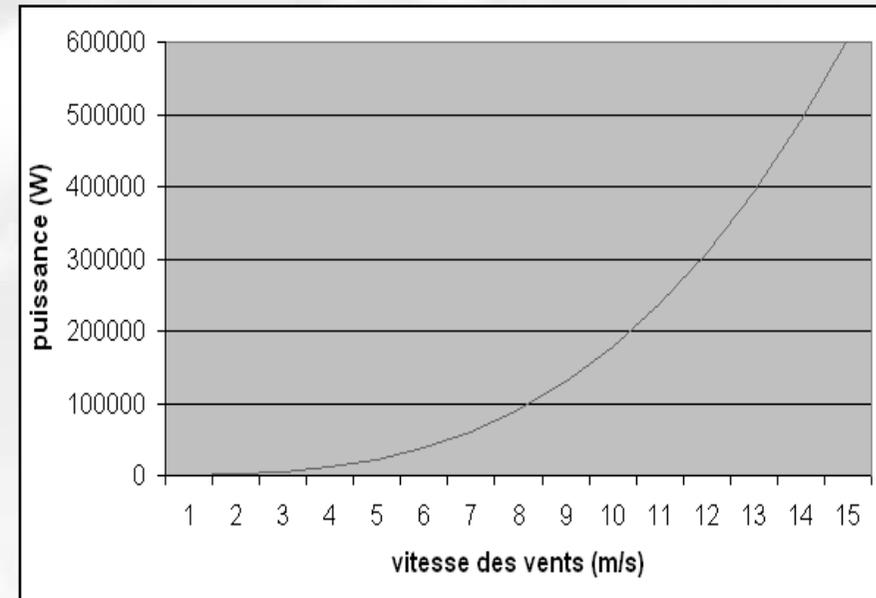
ENERGIE ET PUISSANCE D'UN FLUX LIBRE

$$1) E = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho \frac{\text{Vol}}{t} V^2 = \frac{1}{2} \rho Q V^2$$

$$2) \frac{\text{Vol}}{t} = V \cdot A = \left[\frac{m}{s} m^2 \right] = \left[\frac{m^3}{s} \right]$$



$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 (V \cdot A) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3$$



LE TUB DE COURANT

- $E_c \rightarrow E_{mec}$

- $V_2 < V_1$

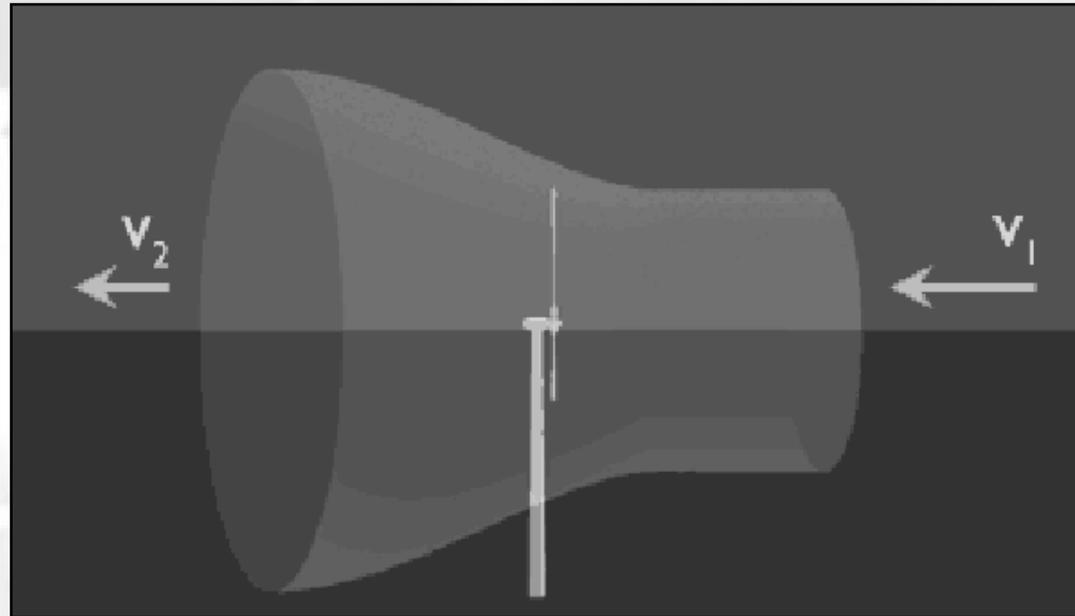
$$\dot{Q} = VA = cnt$$



$$A_2 > A_1$$

- $V_2 \neq 0$

- $V_2 \neq V_1$



Transformation d'énergie plus **efficace**



ratio de vitesses

LA LOI DE BETZ

- Théorie du *Disque Actuateur*

$$\dot{m} = \rho S \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad S = \text{surface_balayée_rotor}$$

- *Bernouilli et Newton*

$$P = \frac{\dot{m}(v_1^2 - v_2^2)}{2}$$



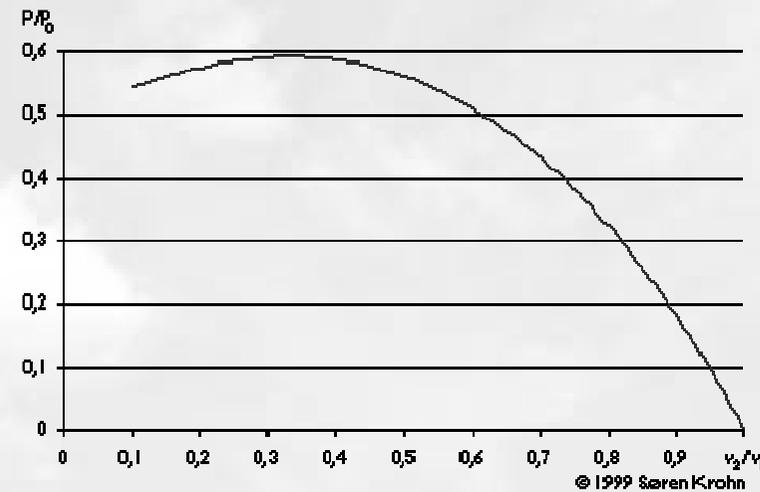
$$P = \frac{\rho}{4} (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) S$$

- Puissance d'un flux d'air non perturbé

$$P_0 = \frac{\rho}{2} v_1^3 S$$

- Ratio: Puissance Récupérée vs. Puissance du Vent

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right)$$



$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{P}{P_{0 \max}} = 0.59 = \frac{16}{27}$$

$$P_{\text{BETZ}} = \left(\frac{16}{27} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3$$

CHAPITRE I: L'éolienne et l'énergie éolienne

CHAPITRE II: Introduction à l'aérodynamique

CHAPITRE III: Introduction au logiciel

CHAPITRE IV: Base théorique du logiciel

CHAPITRE V: Utilisation du logiciel

PUISSANCE RECUPEREE

$$P_{BETZ} = \left(\frac{16}{27}\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3$$

$$\eta_{helice} = 0,7 - 0,85$$

$$\eta_{mécanique} = 0,98$$

$$\eta_{alternater} = 0,96$$

$$\eta_{transmission} = 0,92$$

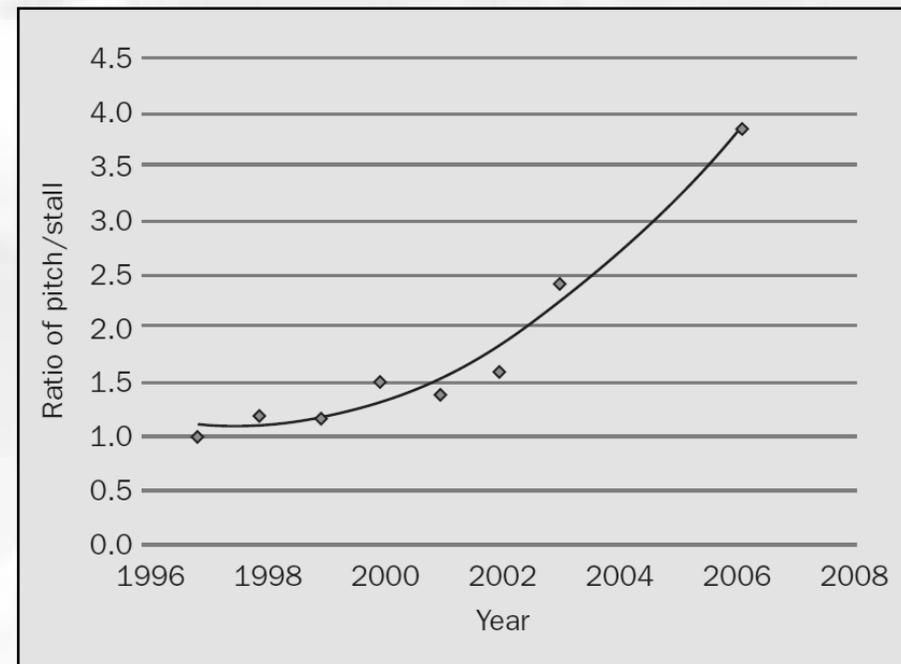
η_{global}



$$P_{rec} = \eta_{global} \cdot \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3$$

SYSTÈMES DE RÉGULATION OU FREINAGE

- **Pitch** → Pas variable
 - Variation de l'angle de calage de les pales
 - Freinage: système **électronique**
 - **Profit maximal** du vent
- **Stall** → Pas fixe
 - Pales fixes par rapport au moyeu
 - Freinage: **décrochage aérodynamique**
 - **Pertes** d'efficacité





CHAPITRE II

Introduction à l'aérodynamique

CHAPITRE I: L'éolienne et l'énergie éolienne

CHAPITRE II: Introduction à l'aérodynamique

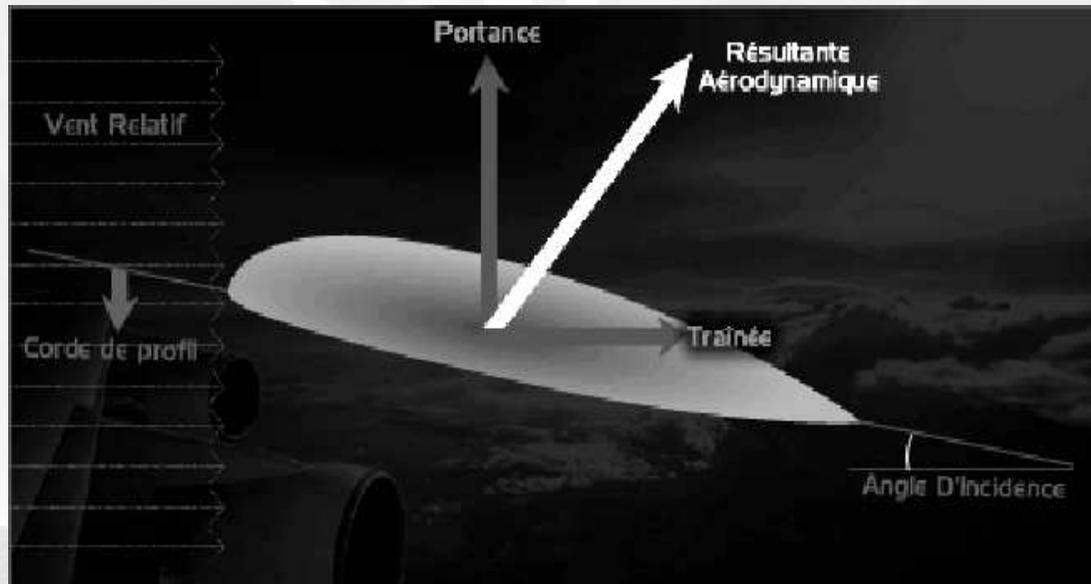
CHAPITRE III: Introduction au logiciel

CHAPITRE IV: Base théorique du logiciel

CHAPITRE V: Utilisation du logiciel

PORTANCE TRAÎNÉE

- Aérodynamique de l'**aviation**
- **Aile** d'avion \approx **Pale** d'éolienne 
- **Portance**
- **Traînée** \rightarrow résistance à l'avancée



CHAPITRE I: L'éolienne et l'énergie éolienne

CHAPITRE II: Introduction à l'aérodynamique

CHAPITRE III: Introduction au logiciel

CHAPITRE IV: Base théorique du logiciel

CHAPITRE V: Utilisation du logiciel

RESULTANT AERODYNAMIQUE

$$C_d = C_x = \frac{R_x}{\frac{\rho}{2} \cdot l \cdot V^2}$$

$$C_l = C_z = \frac{R_z}{\frac{\rho}{2} \cdot l \cdot V^2}$$

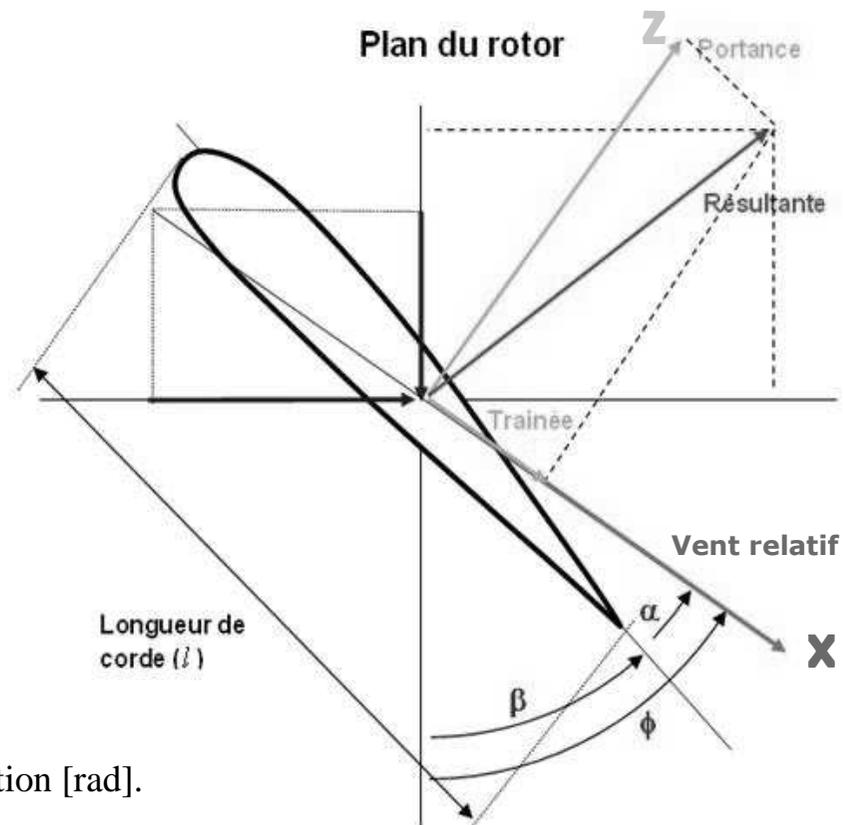
$$C_z = f(\alpha) \text{ et } C_x = g(\alpha)$$

$$R_a^2 = R_x^2 + R_z^2$$

ϕ : angle du vent relatif avec le plan de rotation [rad].

β : angle de calage du profil [rad].

α : angle d'incidence [rad].

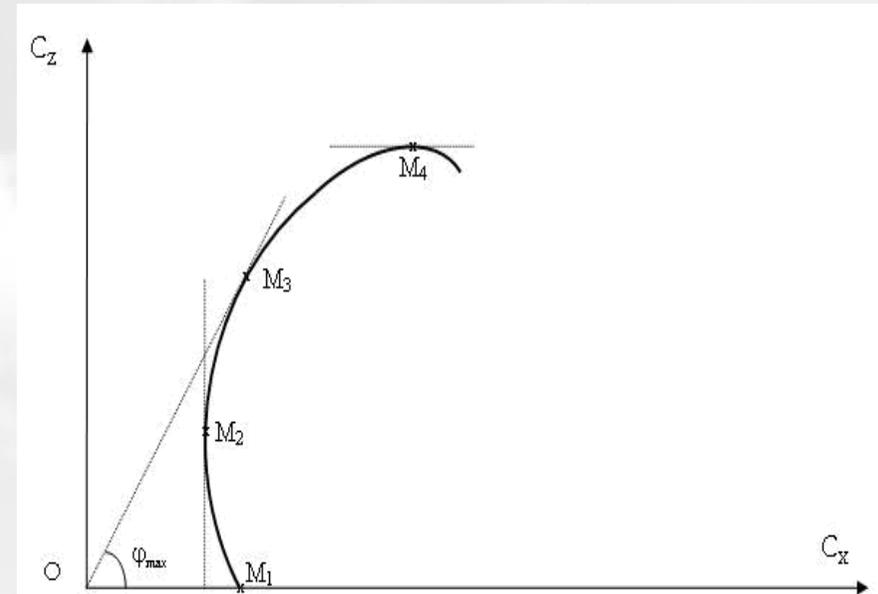


LA POLAIRE DE L'AILE

- 4 points remarquables

- Finesse $f = \frac{C_z}{C_x}$

- f exprime la capacité pour pénétrer à l'air



M1:portance nulle

M2:traînée minimale

M3:finesse maximale

M4:portance maximale

LE NOMBRE DE REYNOLDS

- Alors, il existe une polaire d'aile unique pour chaque aile? **NON!**

$$polaire _ d'aile = f(R_e)$$

$$R_e = \frac{lV\rho}{\mu} = \frac{lV}{\nu}$$

V est la vitesse relative (ms⁻¹) de la pale par rapport à l'air.

l est la longueur de la corde moyenne [m]

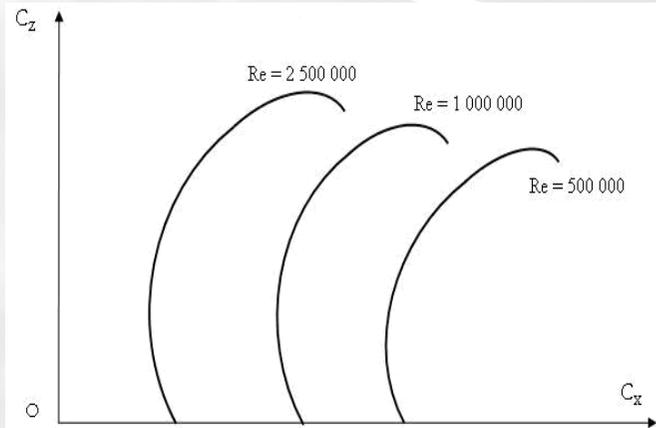
ρ est la masse volumique de l'air [1,225 kg/m³ à 20 °C]

μ est la valeur de la viscosité [1,81 10⁻⁵ m²s⁻¹ à 20 °C].

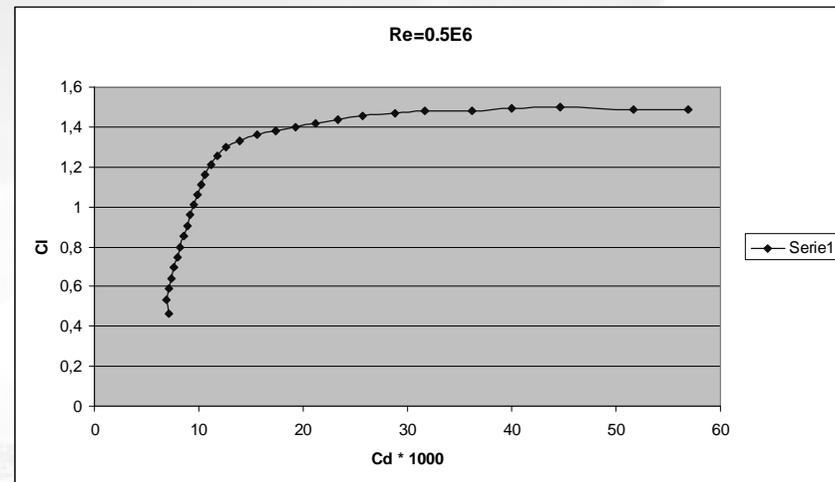
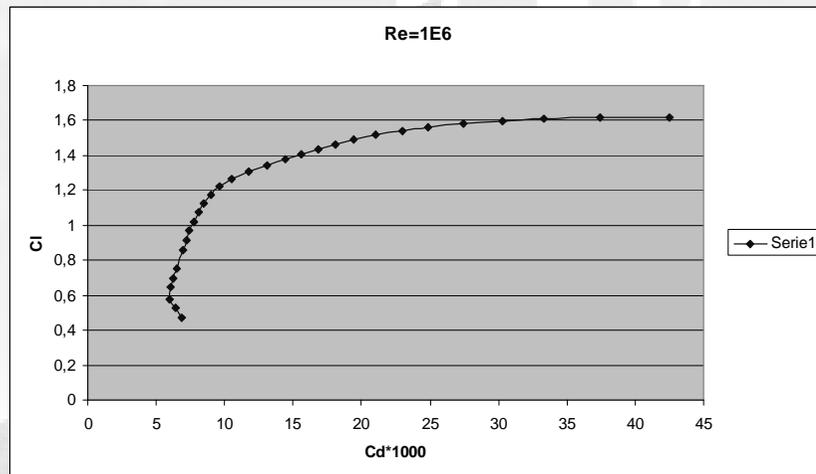
- R_e = rapport entre les forces liées à la **vitesse** et les forces **visqueuses**

- Conditions normales: $\nu = 1.45 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right] \longrightarrow Re \approx 68\,000 \, VI$

IMPORTANCE DU NOMBRE DE REYNOLDS

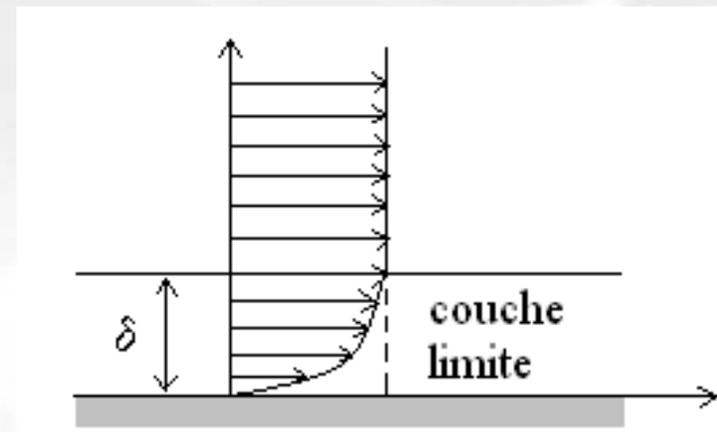
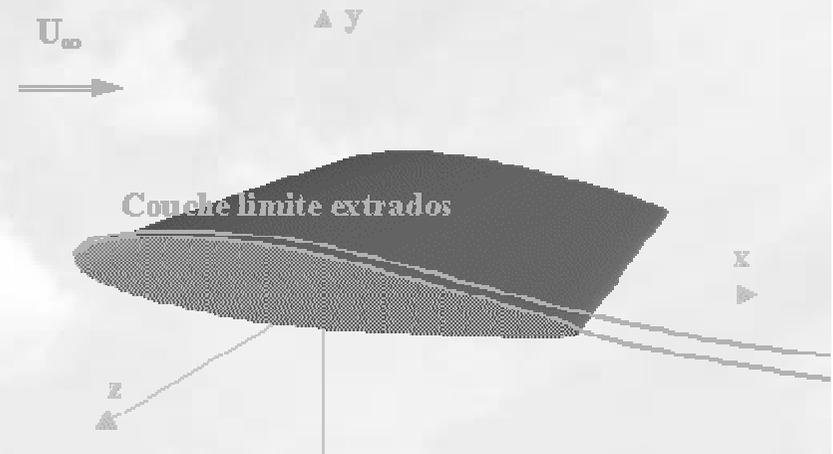


- Re faible \rightarrow les forces de résistance dominant
- Re croît \rightarrow portance et finesse maximales plus grandes
- Une polaire pour chaque Re
- Préférable $\rightarrow Re$ élevé



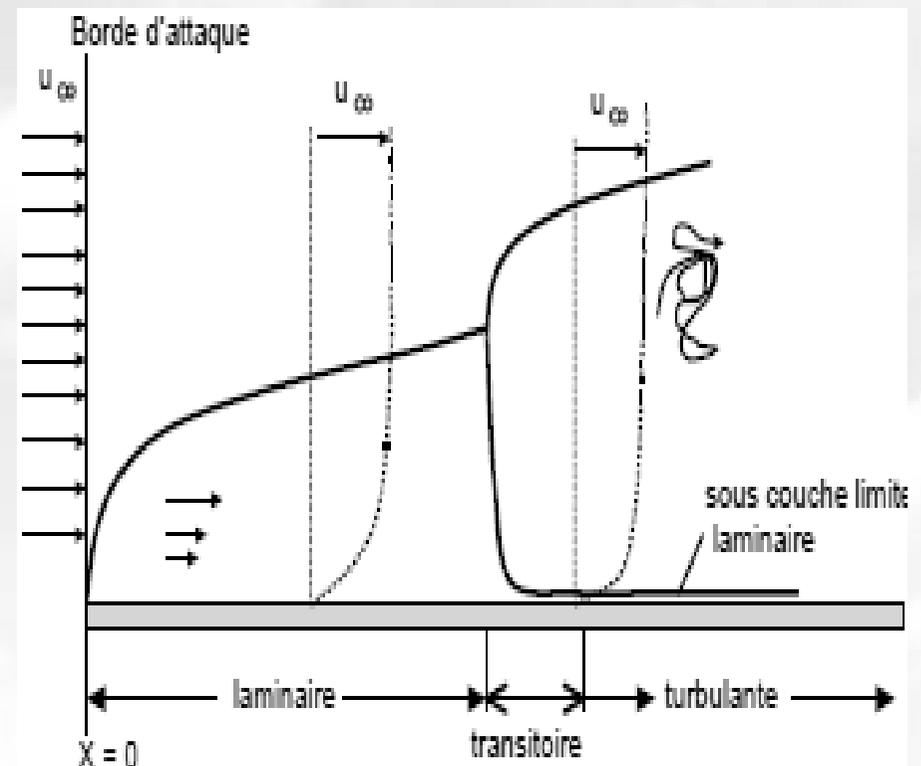
LA COUCHE LIMITE

- Air \approx lames infiniment minces superposées
- Vitesse de l'écoulement libre (V_{el})
- Vitesses **croissantes**
- **Couche limite** \rightarrow des lames se déplaçant à des vitesses $\neq V_{el}$
- Loi de variation \rightarrow dépend de **Re**
- $\downarrow Re \rightarrow$ égalise les vitesses
- $\uparrow Re \rightarrow$ lames + indépendants



DECOLLEMENT DE LA COUCHE LIMITE

- Couche limite **laminaire**
- Couche limite **turbulente**
- **Décollement** de la Couche Limite
→ **perte de portance**
- Régime laminaire → **décollement**
plus rapide et probable
- Aéronautique → turbulence



Régime turbulente

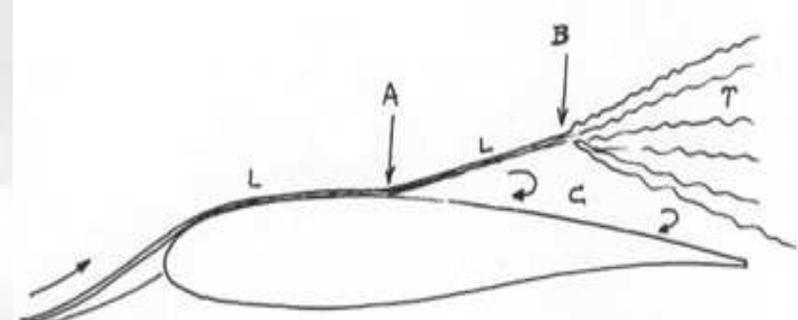
INFLUENCE DU NOMBRE DE REYNOLDS

- Petits Re
- Décollement à *couche limite décollée de l'extrados*

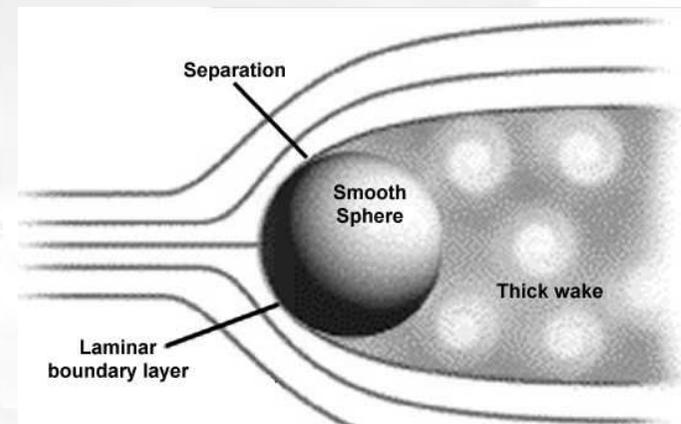


Régime *sous-critique*

- Portance ↓
- Traînée ↑



A point de décollement
B point de transition
C zone morte
L écoulement laminaire
T écoulement turbulent



- **Re élevés ($>10^6$)**
- Couche limite décollée → atteint le bord de fuite



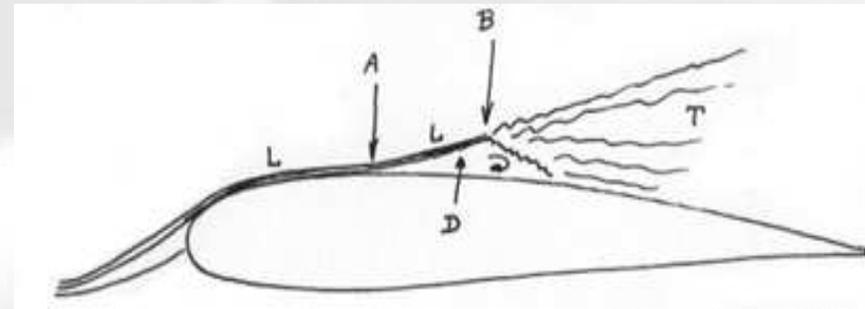
Re critique

- Traînée ↓
- Portance ↑
- $Re \uparrow \rightarrow$ c.l. turbulente plus fine
→ traînée ↓↓

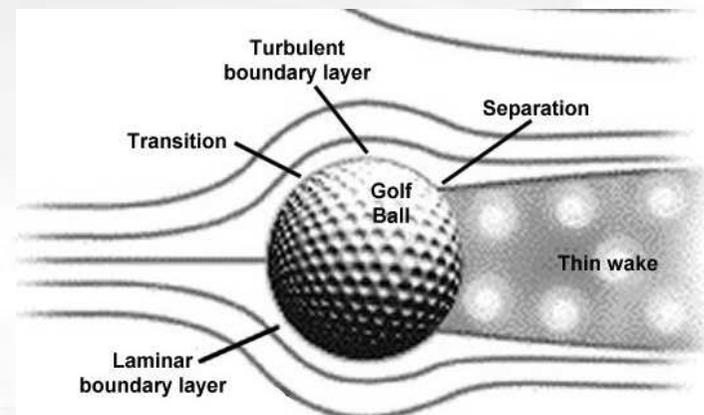


Régime *sur-critique*

INFLUENCE DU NOMBRE DE REYNOLDS

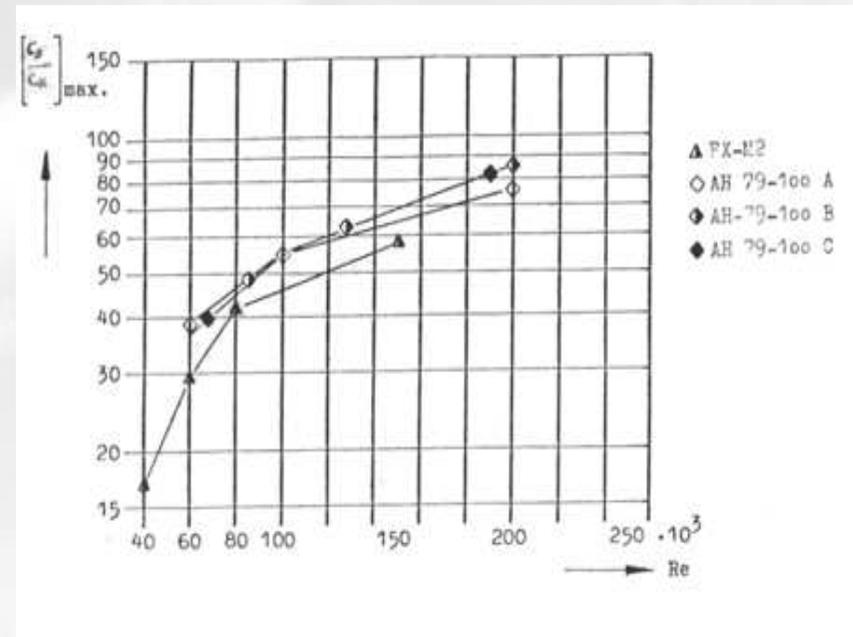


A point de décollement
B point de transition
D bulle décollé laminaire
L écoulement laminaire
T écoulement turbulent



LE NOMBRE DE REYNOLDS CRITIQUE

- $Re < Re_{\text{critique}} \rightarrow \downarrow$ des performances de la pale
- Graphique: Re_{critique} pour profil *FX-M2* = 80.000



Finesse maximale vs. Reynolds

CHAPITRE III

Base théorique du logiciel



CHAPITRE I: L'éolienne et l'énergie éolienne

CHAPITRE II: Introduction à l'aérodynamique

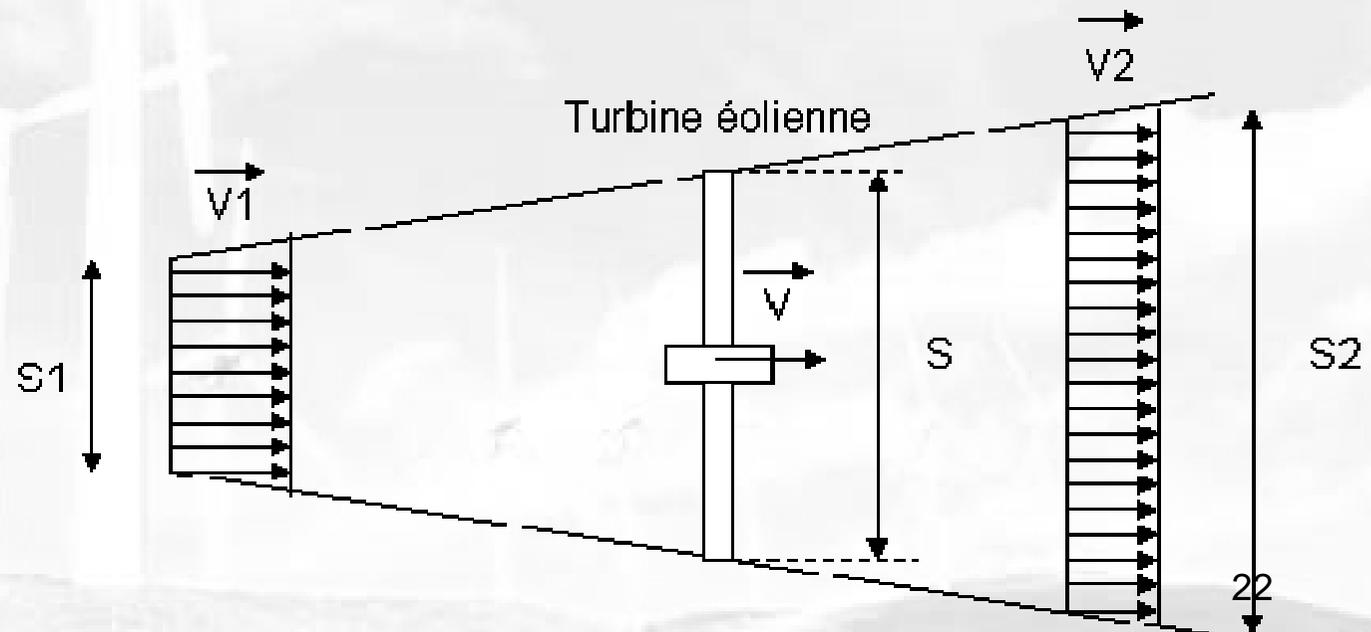
CHAPITRE III: Base théorique du logiciel

CHAPITRE IV: Introduction au logiciel

CHAPITRE V: Utilisation du logiciel

LA THÉORIE DU MOMENT AXIAL DE FROUDE

- Modèle le plus simple: ***Actuator Disk Model***
- **But** : démonstration de Vitesse rotor \neq Vitesse de l'écoulement libre
- Disque actuateur \rightarrow dispositif de **traînée**



FACTEUR D'INDUCTION AXIAL

- **Bernouilli**
- **Équation du moment axial**
- **Conservation de la masse**

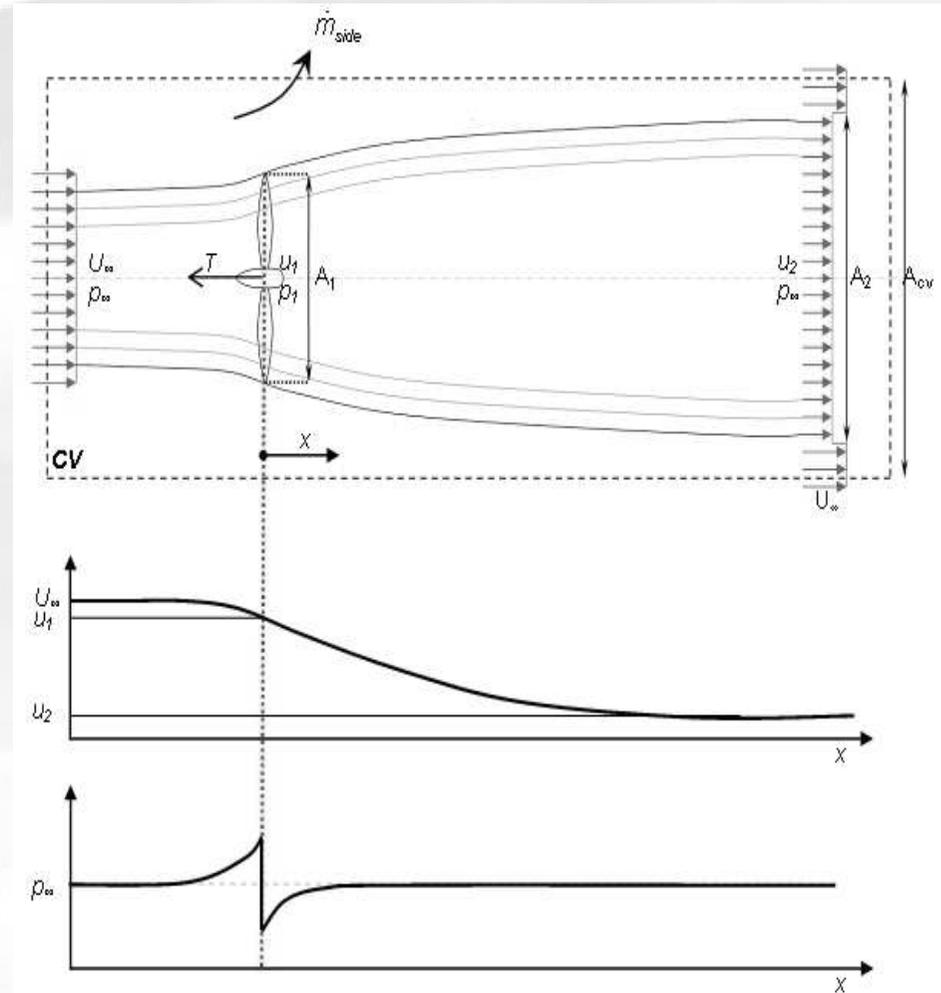
$$u_1 = \frac{1}{2} (U_\infty + u_2)$$



$$U - u_1 = a U$$

$$U - u_2 = 2a U$$

- **a = facteur d'induction axial**
- V_{\min} écoulement libre = 0 \rightarrow
 $a_{\max} = 0.5$



COEFFICIENT DE PUISSANCE

- 1^{ère} loi thermodynamique

$$\left\{ \begin{array}{l} P = 0,5 \rho A (U^2 - u_2^2) \quad u_1 = 0,5 \rho A u_1 (U + u_2) (U - u_2) \\ U - u_1 = a U \quad \text{et} \quad U - u_2 = 2a U \end{array} \right.$$

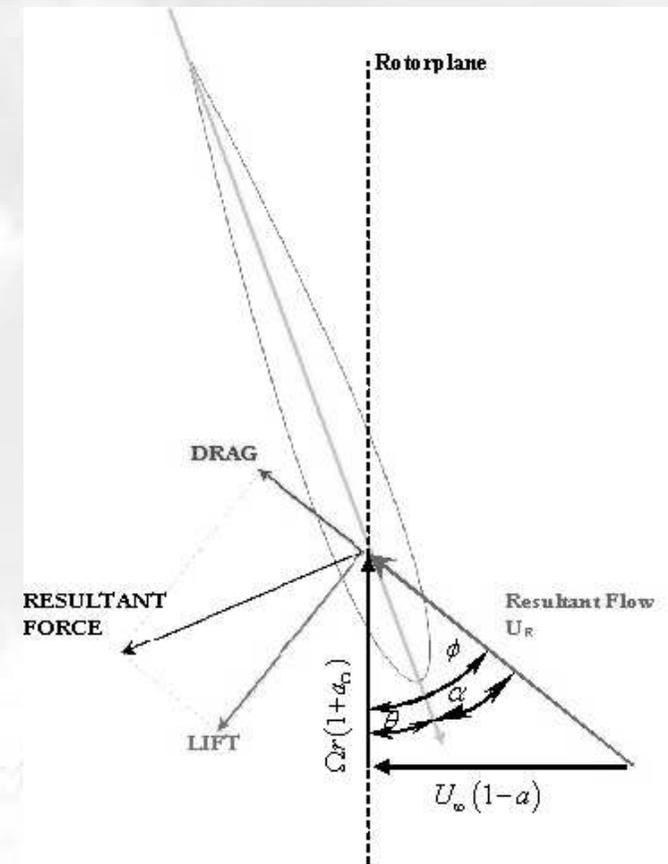
$$\begin{array}{ccc} \text{L} \rightarrow & C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} = \frac{4U^3 a(1-a)^2}{U^3} & \rightarrow C_p = 4a(1-a)^2 \end{array}$$

- $C_{p \max} = (16/27) = 0,593$

CONSIDÉRATIONS DU ROTATIONNEL

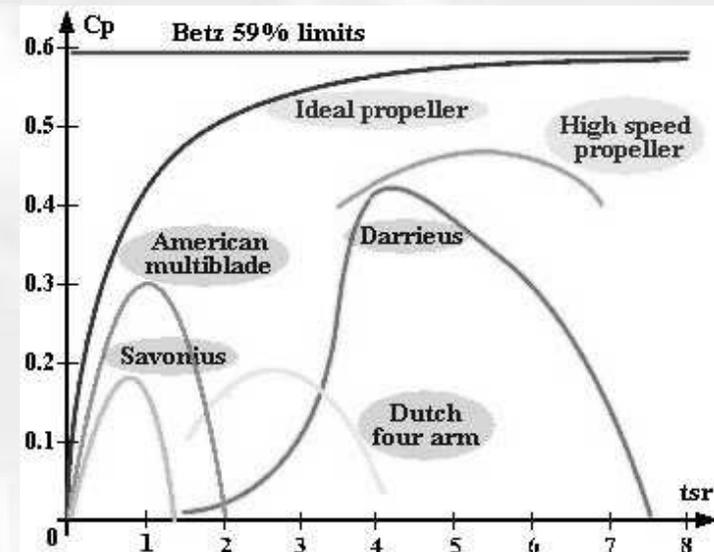
- **Rotation** dans le sillage
- Equation d'Euler
- $a_{\Omega}(b)$ = **facteur d'induction rotationnel**
- Graphique:

$$\tan \phi = \frac{(1-a)U_{\infty}}{(1+a_{\Omega})\Omega r}$$



LE TIP SPEED RATIO (TSR)

- $\lambda = \frac{\Omega r}{U_{\infty}}$
- \uparrow TSR \rightarrow \uparrow efficacité
- \uparrow TSR \rightarrow \uparrow niveau de bruit
- \uparrow TSR \rightarrow \uparrow nécessité de pales plus résistantes
- Courbe verte \rightarrow éolienne à axe horizontale
- **TSR = 6/7** \rightarrow meilleur rendement



LA THÉORIE DE L'ÉLÉMENT PALE

- Complète l'étude: **dessin de la pale** → forme, section, calage
- Modélisation **bidimensionnelle** du rotor
- Intégration → la poussée, le couple et la puissance
- **Discrétisation** du V.C → N éléments d'épaisseur dr
 - Éléments aillées
 - Nombre de pales **infini**

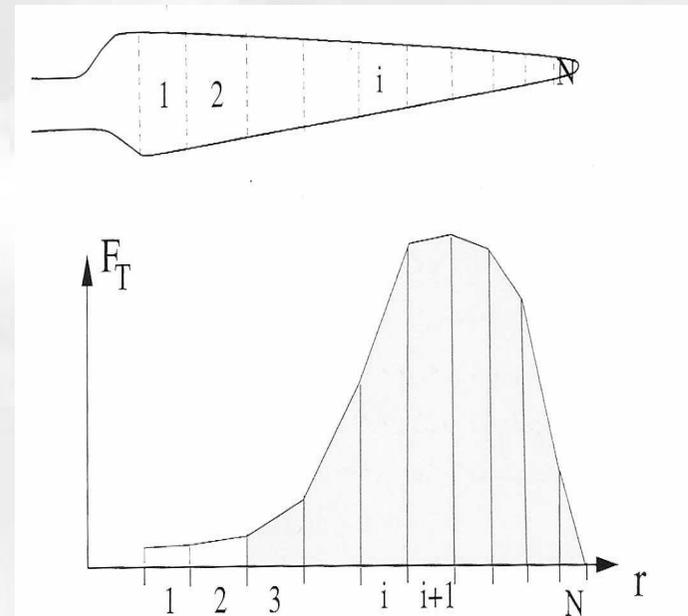


Figure 8.4. A linear variation of the tangential force is assumed between two different radial positions r_i and r_{i+1}

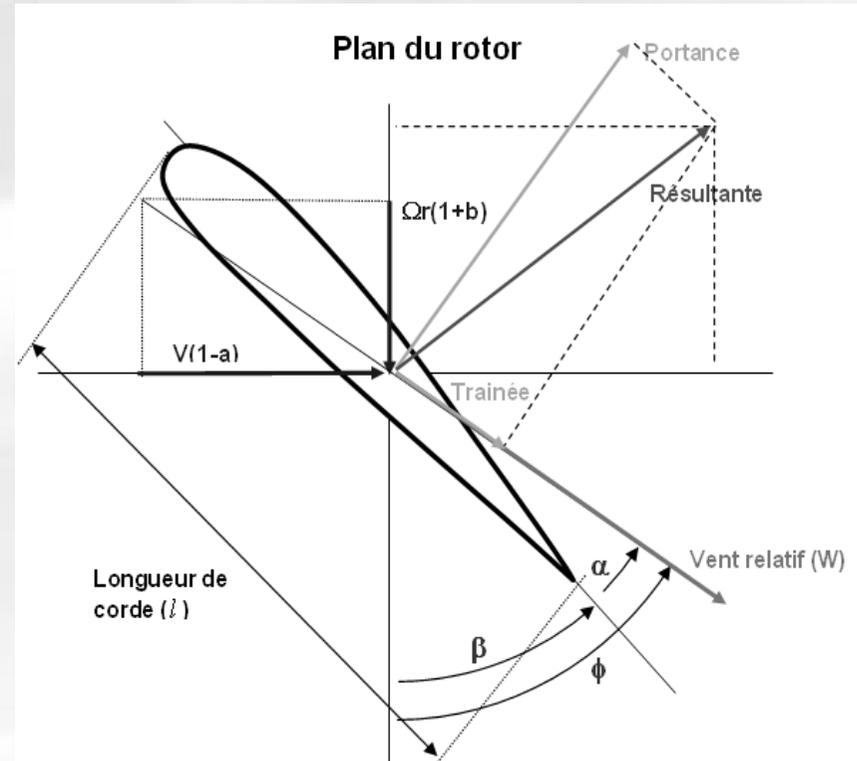
TRIANGLE DES VITESSES

- Triangle des vitesses d'un élément pale
 - Vitesse axiale: $V(1-a)$
 - Vitesse tangentielle: $\Omega r(1+b)$

$$\tan \phi = \frac{(1-a)}{(1+b)} \cdot \frac{V}{\Omega r}$$

$$\phi = \beta + \alpha$$

$$W = \sqrt{V_{ax}^2 + V_{tan}^2}$$



ϕ : angle du vent relatif avec le plan de rotation [rad].

β : angle de calage du profil [rad]

α : angle d'incidence [rad].

COEFFICIENTS ET FORCES

- Coefficients de portance et traînée

$$C_d = \frac{R_z}{\frac{\rho}{2} \cdot l \cdot V^2}$$

$$C_l = \frac{R_x}{\frac{\rho}{2} \cdot l \cdot V^2}$$

ρ : densité du fluide

R_z : force en direction du flux

R_x : force en direction normal au flux

V : vitesse du flux

- Les composantes poussée, C_T et tangentielle, C_M

$$C_T = C_l \cdot \cos \phi + C_d \cdot \sin \phi$$

$$C_M = C_l \cdot \sin \phi - C_d \cdot \cos \phi$$

- Les forces

$$dR_z = C_l \cdot \frac{\rho}{2} \cdot l \cdot W^2 \cdot dr$$

$$dR_x = C_d \cdot \frac{\rho}{2} \cdot l \cdot W^2 \cdot dr$$

- Poussée

$$dF_T = dR_z \cdot \cos \phi + dR_x \cdot \sin \phi$$

- Force

$$dF_M = dR_z \cdot \sin \phi - dR_x \cdot \cos \phi$$

- Couple

$$dQ_M = r \cdot dM$$

Intégration en long de la pale

- Poussée axiale $\rightarrow F_T = p \cdot \int_0^R dF_T$

- Couple de poussée $\rightarrow Q_T = p \cdot \int_0^R r \cdot dF_T$

- Force motrice $\rightarrow F_M = p \cdot \int_0^R dF_M$

- Couple de moteur $\rightarrow Q_M = p \cdot \int_0^R r \cdot dF_M$

- **Puissance** $\rightarrow P = \Omega \cdot Q_M = p \cdot \Omega \cdot \int_0^R r \cdot dF_M$

- Moment de flexion $\rightarrow M_f = \sqrt{Q_T^2 + Q_M^2}$

CALCUL DES PARAMETRES *a* ET *b*

• Débit de masse → $\rho \cdot V(1-a) \cdot 2\pi r \cdot dr$

• Variation de la quantité de mouvement →

$$\rho \cdot V(1-a) \cdot 2\pi r \cdot dr \cdot [V - V(1-2a)]$$

• Force appliquée par les p pales → $p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W^2 \cdot l \cdot C_T \cdot dr$

• Triangle des vitesses → $\frac{V \cdot (1-a)}{W} = \sin \phi$



$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{p \cdot l \cdot C_t}{8\pi r \cdot \sin^2 \phi}$$

CALCUL DES PARAMETRES a ET b

- Moment de la quantité de mouvement →

$$\rho \cdot V (1 - a) \cdot r \cdot 2 \pi r \cdot dr \cdot 2 b \Omega = \frac{\rho}{2} \cdot p \cdot W^2 \cdot l \cdot C_M \cdot dr$$

- Triangle des vitesses →

$$\frac{\omega r(1+b)}{W} = \cos \phi$$



$$\frac{b}{(1+b)} = \frac{p \cdot l \cdot C_M}{4 \pi r \cdot \sin 2 \phi}$$

CORRECTIONS DES PARAMETRES a ET b

- Correction du nombre infini de pales → **Prandtl**
- Nappes tourbillonnaires \approx lignes parallèles à la distance d

$$d = \frac{2\pi(r/R)}{p} \cdot \sin \phi_t$$

avec $\phi_t = \phi$ pour $r/R = 1$

- Facteur de **réduction de la circulation** de Prandtl

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}[\exp(-f)]$$

avec

$$f = \frac{\pi \cdot (1 - (r/R))}{d} = \frac{p}{2} \cdot \frac{1 - (r/R)}{\sin \phi_t}$$



Visualisation du vortex créé en bout d'une pale de 10 dans une soufflerie de la NASA

CORRECTIONS DES PARAMETRES a ET b

- 2^{ème} correction → contrôler les hauts facteurs d'induction axiale
- $a_{\text{critique}} = 0,2$
- Correction empirique si l'on est au-dessus de a_{critique}

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right]$$

$$K = \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_t}$$

FACTEURS a ET b CORRIGÉS

- $\sigma = \text{solidité} \rightarrow \sigma = \frac{p \cdot l}{2\pi r}$

- Prandtl

$$aF \cdot (1 - aF) = \frac{\sigma \cdot C_T}{4 \cdot \sin^2 \phi} \cdot (1 - a)^2$$

$$\frac{b}{(1 + b)} = \frac{\sigma \cdot C_M}{2F \cdot \sin 2\phi}$$

- Nouvelles valeurs

$$a_{corr} = \left[1 + \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_T} \right]^{-1} \quad \text{si } a \leq 0,2$$

$$a_{corr} = \frac{1}{2} \left[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \quad \text{si } a > 0,2$$

$$b_{corr} = \left[\frac{4F \sin \phi \cdot \cos \phi}{\sigma C_M} - 1 \right]^{-1}$$

CHAPITRE IV

Introduction au logiciel



INTRODUCTION AU LOGICIEL

- Le **but** du logiciel: courbes de puissance et rendement
- **Données initiales**
- Choix 1: type de **régulation**
- Choix 2: type de **profil**
- Choix 3: **longueur de corde**
- Choix 4: angles de **calage**

Paramétrage Primaire

Nombre de Pales: 3
Vitesse de vent nominal [m/s]: 8
Densité de l'air [kg/m³]: 1,25
Puissance Nominal [W]: 300000
Longueur des pales [m]: 17

Paramétrage Secondaire

Régulation:
Effet Stall:
Calage Variable:

Type de profil
 Profils optimaux (Viterna)
 Polaire enregistrée dans feuille de calcul
 Choix des polaires: Cd(α) et Cl(α):

incidence (°)	Trainée Cd	Portance Cl
-5°	0,006	-0,05
0°	0,006	0,35
5°	0,008	0,893
10°	0,026	1,246
15°	0,076	1,294
20°	0,141	1,231
25°	0,229	1,137
30°	0,330	1,07
35°	0,442	1,039
40°	0,562	1,031
45°	0,686	1,038
50°	0,810	1,055
55°	0,930	1,078
60°	1,043	1,104

Vrillage
 Calage défaut optimisé vent nominal
 Choix des angles de calages (°):

r=0.1 R	15
r=0.2 R	13,77
r=0.3 R	12,55
r=0.4 R	11,33
r=0.5 R	10,1
r=0.6 R	8,88
r=0.7 R	7,65
r=0.8 R	6,44
r=0.9 R	5,21
r= R	4

Calage défini par une droite (=aR+b)
Calage(°)au débout de pale: 15
Calage(°)en bout de pale: 15

Longueurs de Corde:
 Longueurs optimales
 Choix des longueurs de corde (%):

r=0.1 R	6,5
r=0.2 R	8,2
r=0.3 R	8,1
r=0.4 R	7,1
r=0.5 R	6,2
r=0.6 R	5,3
r=0.7 R	4,5
r=0.8 R	3,6
r=0.9 R	2,8
r= R	2,1

Lancer le Calcul

CHAPITRE I: L'éolienne et l'énergie éolienne

CHAPITRE II: Introduction à l'aérodynamique

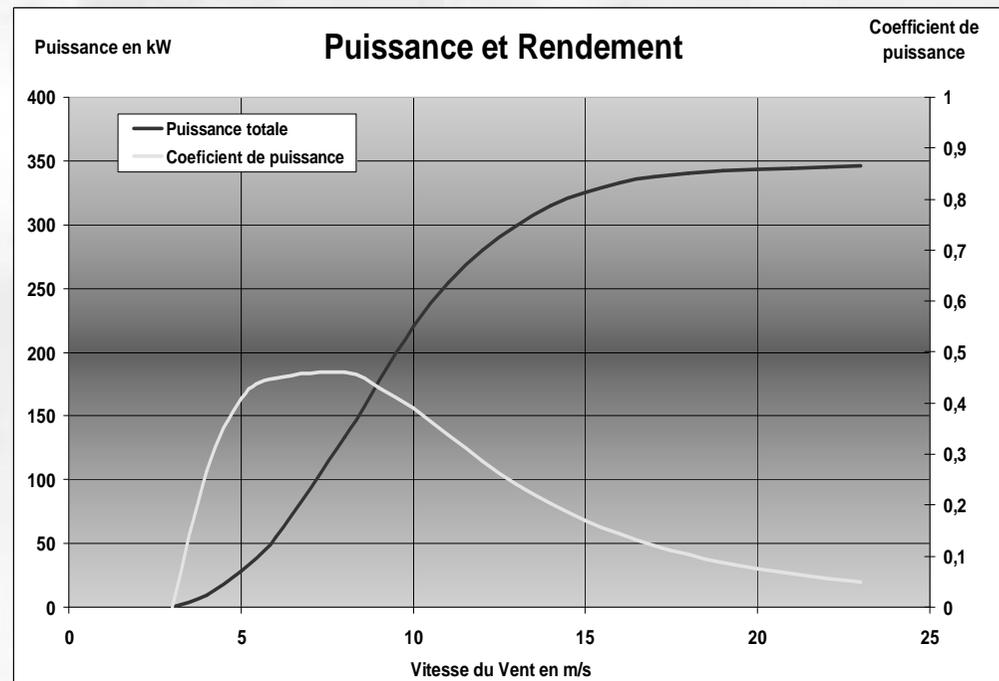
CHAPITRE III: Base théorique du logiciel

CHAPITRE IV: Introduction au logiciel

CHAPITRE V: Utilisation du logiciel

LE BUT DU LOGICIEL: COURBES DE PUISSANCE ET RENDEMENT

- ***Puissance récupérée vs. Vitesse du vent***
- Freinage à la *Puissance Nominale* (P_{nom})
- ***Rendement vs. Vitesse du vent***
- Rendement maximal à la vitesse moyenne



DONNEES INITIALS

- p : nombre de **pales** de l'éolienne
- ρ : **densité** de l'air
- V : **vitesse** du vent **moyenne** au lieu choisi
- P_{nom} : **Puissance nominale** de la génératrice de l'éolienne (ou R : **rayon** de l'éolienne)
- λ : rapport entre vitesse du vent et le productif de vitesse angulaire et rayon
- η : rendement global de l'éolienne

Nombre de Pales	<input type="text" value="3"/>
Vitesse de vent nominal [m/s]	<input type="text" value="8"/>
Densité de l'air [kg/m ³]	<input type="text" value="1,25"/>
Puissance Nominal [W]	<input type="text" value="300000"/> <input type="checkbox"/>
Longueur des pales [m]	<input type="text" value="17"/> <input type="checkbox"/>

Paramétrage Secondaire

CHAPITRE I: L'éolienne et l'énergie éolienne

CHAPITRE II: Introduction à l'aérodynamique

CHAPITRE III: Base théorique du logiciel

CHAPITRE IV: Introduction au logiciel

CHAPITRE V: Utilisation du logiciel

CALCUL DE LA PUISSANCE ET LE RAYON

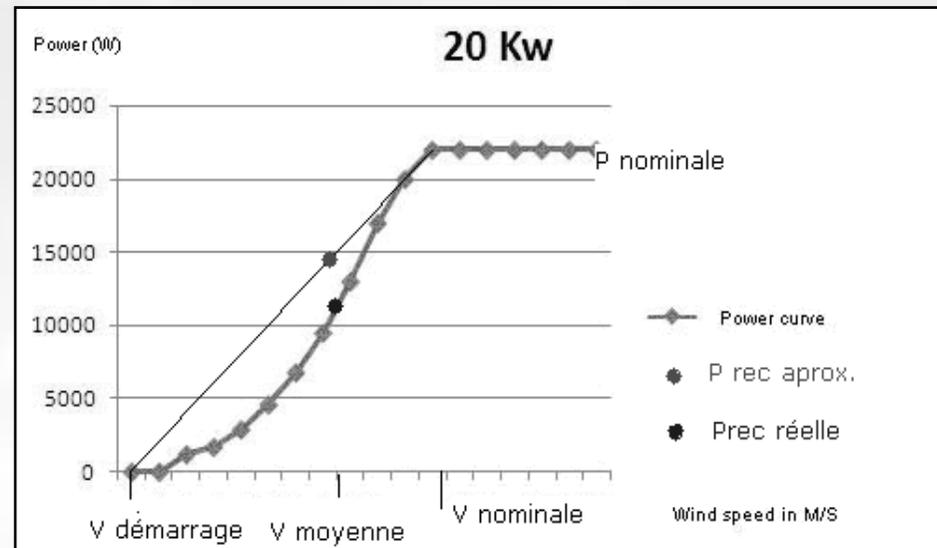
- V_{dem} , V_{nom} et P_{nom} → assimilation de la courbe à une droite
- P_{rec} à la vitesse moyenne (approximation)

$$P = \eta \cdot \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot \pi \cdot V^3 \cdot R^2$$



$$R = \sqrt{\frac{P}{\eta \cdot \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot \pi \cdot V^2}}$$

- Puissance récupérée à partir du rayon
- $R \rightarrow P_{rec}$
- V_{dem} , V_{nom} et $P_{rec} \rightarrow P_{nom}$



CHOIX 1: TYPE DE RÉGULATION

- **Objectif:** freiner à la P_{NOM} de la génératrice
- **Pitch:** profit maximal de l'énergie → control externe
- $\eta_{hélice} = \text{maximal} = 0,85$
- **Stall:** décrochage aérodynamique
- $\eta_{hélice} = \text{non maximal}$

Régulation:

Effet Stall

Calage Variable

CHOIX 2: TYPE DE PROFIL

- Profil NACA 4412
 - On connaît les coefficients de portance, C_z , et traînée, C_x , pour chaque angle d'incidence, α
- Profil NACA 63215
 - On ne connaît que les C_x et C_z pour les α jusqu'à environ $30^\circ \rightarrow$ **Viterna-Corrigan**
- Coefficients introduits par l'utilisateur

Type de profil

Profils optimaux (Viterna)

Polaire enregistrée dans feuille de calcul

Choix des polaires: $C_d(\alpha)$ et $C_l(\alpha)$:

incidence ($^\circ$)	Trainée C_d	Portance C_l
-5 $^\circ$	0,006	-0,05
0 $^\circ$	0,006	0,35
5 $^\circ$	0,008	0,893
10 $^\circ$	0,026	1,246
15 $^\circ$	0,076	1,294
20 $^\circ$	0,141	1,231
25 $^\circ$	0,229	1,137
30 $^\circ$	0,330	1,07
35 $^\circ$	0,442	1,039
40 $^\circ$	0,562	1,031
45 $^\circ$	0,686	1,038
50 $^\circ$	0,810	1,055
55 $^\circ$	0,930	1,078
60 $^\circ$	1,043	1,104

CHOIX DE PROFIL

- **NACA 63215**
- **Problème:** essais insuffisants de soufflerie
- **Objectif:** C_l e C_d à la zone post stall → **Viterna Corrigan**

C_l/C_d	$C_l = A_1 \cdot \sin^2 \alpha + A_2 \left(\frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right)$	$C_d = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha$
A_1/B_1	$A_1 = \frac{B_1}{2}$	$B_1 = C_{d\max}$ $C_{d\max} = 1,11 + 0,018 \cdot AR$
A_2/B_2	$A_2 = (C_{ls} - C_{d\max} \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s) \cdot \left(\frac{\sin \alpha_s}{\cos^2 \alpha_s} \right)$ $\alpha_s = 15^\circ$	$B_2 = \left(\frac{1}{\cos \alpha_s} \right) \cdot (C_{ds} - C_{d\max} \cdot \sin^2 \alpha_s)$ $C_{ds} = 0.075$

CHOIX 3: LONGUEUR DE CORDE

1. Longueurs optimales → la méthode de **Glauert**
2. Longueurs introduites par l'utilisateur

CHOIX 4: ANGLES DE CALAGE

1. Calage optimal → la méthode de **Glauert**
2. Calage introduit par l'utilisateur
3. Calage à partir d'une droite →
 $\beta = AR+B$

The screenshot shows a software interface with two main sections: 'Vrillage' (Twist) and 'Longueurs de Corde:' (Chord Lengths). Both sections have checkboxes for 'Calage défaut optimisé vent nominal' and 'Choix des angles de calages (°)'. The 'Vrillage' section includes a table of twist angles for different radii (r) and a checkbox for 'Calage défini par une droite (=aR+b)'. The 'Longueurs de Corde:' section includes a table of chord lengths for different radii (r) and a checkbox for 'Choix des longueurs de corde (%)'. The background of the interface is a blurred image of a wind turbine.

Choix des angles de calages (°)	Choix des longueurs de corde (%)
r=0.1 R: 15	r=0.1 R: 6,5
r=0.2 R: 13,77	r=0.2 R: 8,2
r=0.3 R: 12,55	r=0.3 R: 8,1
r=0.4 R: 11,33	r=0.4 R: 7,1
r=0.5 R: 10,1	r=0.5 R: 6,2
r=0.6 R: 8,88	r=0.6 R: 5,3
r=0.7 R: 7,65	r=0.7 R: 4,5
r=0.8 R: 6,44	r=0.8 R: 3,6
r=0.9 R: 5,21	r=0.9 R: 2,8
r= R: 4	r= R: 2,1

CALAGES ET LONGUEURS OPTIMALES

$$b = \frac{(1 - 3 \cdot a)}{(4 \cdot a - 1)}$$

$$\frac{b \cdot (1 + b)}{a \cdot (1 - a)} = \frac{V^2}{\Omega^2 \cdot r^2} = \frac{1}{x^2}$$

$$x = (4 \cdot a - 1) \cdot \sqrt{(1 - a) / (1 - 3 \cdot a)}$$

- Miller → série approximative



$$a \cong \left(\frac{1}{3}\right) - \left(\frac{2}{81 \cdot x^2}\right) + \left(\frac{10}{729 \cdot x^4}\right) - \left(\frac{418}{59049 \cdot x^6}\right) + \dots$$

- $\phi \rightarrow \tan \phi = (1 - a) \cdot \sqrt{(1 - a) / (1 - 3 \cdot a)}$

- Corde optimal

$$\frac{p \cdot \Omega}{8 \cdot \pi \cdot V} \cdot (l \cdot C_l) = \left[\frac{(4 \cdot a - 1)}{(1 - 2 \cdot a)} \right] \cdot \sqrt{(1 - a) \cdot (1 - 3 \cdot a)}$$

CALAGES ET LONGUEURS OPTIMALES

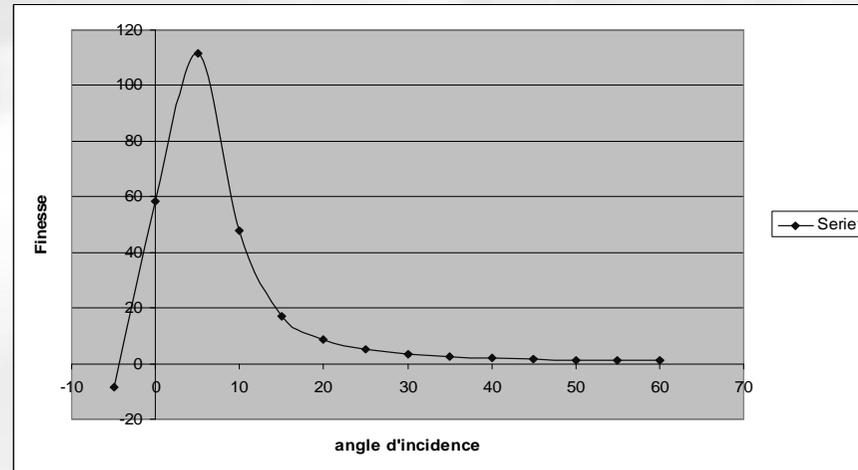
- Calcul du **rotor optimal** → **Glauert**
- Supposition: traînée nulle → **$C_d=0$**
- **Calage optimal**



$$\beta = \phi - \alpha$$

α dont la finesse est maximale

- **Corde optimal**
- C_l → coefficient de portance à α optimal



$$\frac{p \cdot \Omega}{8 \cdot \pi \cdot V} \cdot (l \cdot C_l) = \left[\frac{(4 \cdot a - 1)}{(1 - 2 \cdot a)} \right] \cdot \sqrt{(1 - a) \cdot (1 - 3 \cdot a)}$$

ALGORITHME MATHÉMATIQUE

1) Initialisation de
 a et $b \rightarrow \mathbf{a=b=0}$

2) Angle du vent relatif Φ

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a) \cdot V_0}{(1+a') \cdot \omega \cdot r} \right)$$

3) Angle d'incidence α

$$\alpha = \phi - \beta$$

4) C_l et C_d

5) Coefficients des forces

$$C_n = C_l \cdot \cos \phi + C_d \cdot \sin \phi$$

$$C_t = C_l \cdot \sin \phi - C_d \cdot \cos \phi$$

6) Calcul du facteur F

8) Test de **convergence**

$$|a_{\text{nouveau}} - a_{\text{ancien}}| < \xi$$

$$|b_{\text{nouveau}} - b_{\text{ancien}}| < \xi$$

7) Nouveaux a et b

CHAPITRE V

Utilisation du logiciel



CHAPITRE I: L'éolienne et l'énergie éolienne

CHAPITRE II: Introduction à l'aérodynamique

CHAPITRE III: Introduction au logiciel

CHAPITRE IV: Base théorique du logiciel

CHAPITRE V: Utilisation du logiciel

EXEMPLE DE PROGRAMMATION

Sub iteration()

Dim i As Integer

'Itérations

i = 0

While (i < 100 And
Sheets("Feuille1").Range("J13")
).Value <> 0)

*'copie des valeurs des profils
(feuille Polaires ou
Polaires_ext en fonction du
choix)*

If(Sheets("Polaires_ext").Range
("M6").Value <> 1) Then
'polaires viterna

Call Coeffs_viterna

Else 'polaires ext

Call coeffs_ext

End If

'stockage des valeurs de a et b

Range("L20:M29").Select

Selection.Copy

Range("H3").Select

Selection.PasteSpecial

Paste:=xlValues,

Operation:=xlNone,

SkipBlanks:=False,

Transpose:=False

i = i + 1

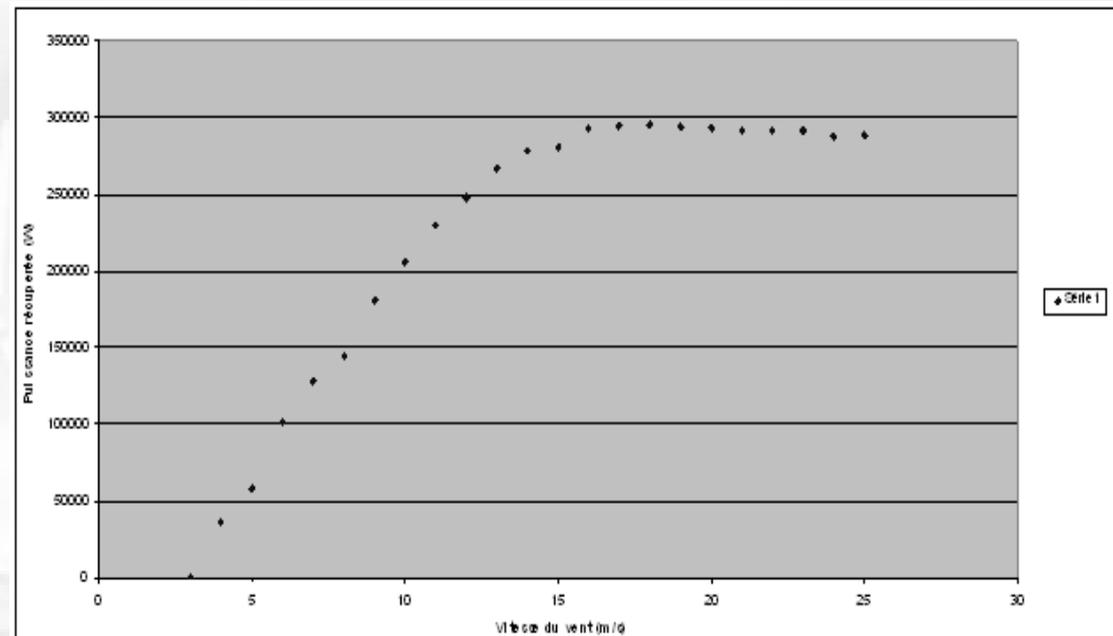
Wend

End Sub

VÉRIFICATION DES RESULTATS

Enercon E32/300

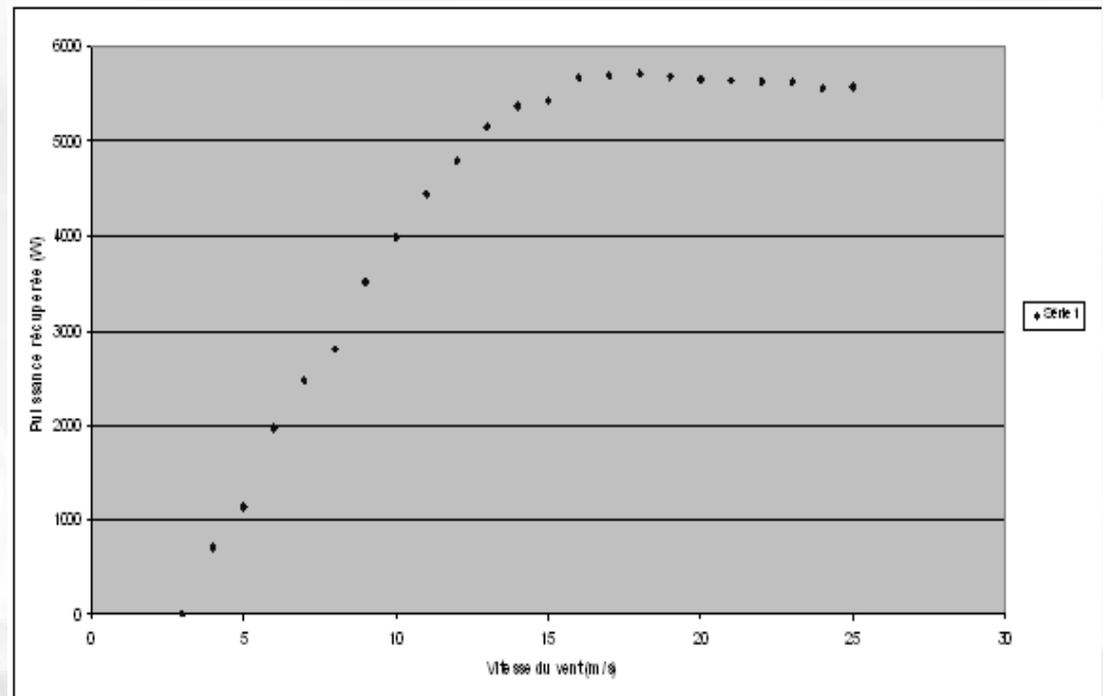
- **Type régulation** : Stall
- **Longueur de la pale** : 16 m
- **Puissance nominale** : 300 kW
- **Vitesse moyenne** : 8 m/s
- **Vitesse démarrage** : 4 m/s
- **Vitesse nominal** : 14 m/s
- **Rendement** = 0.7
- $\lambda = 7$

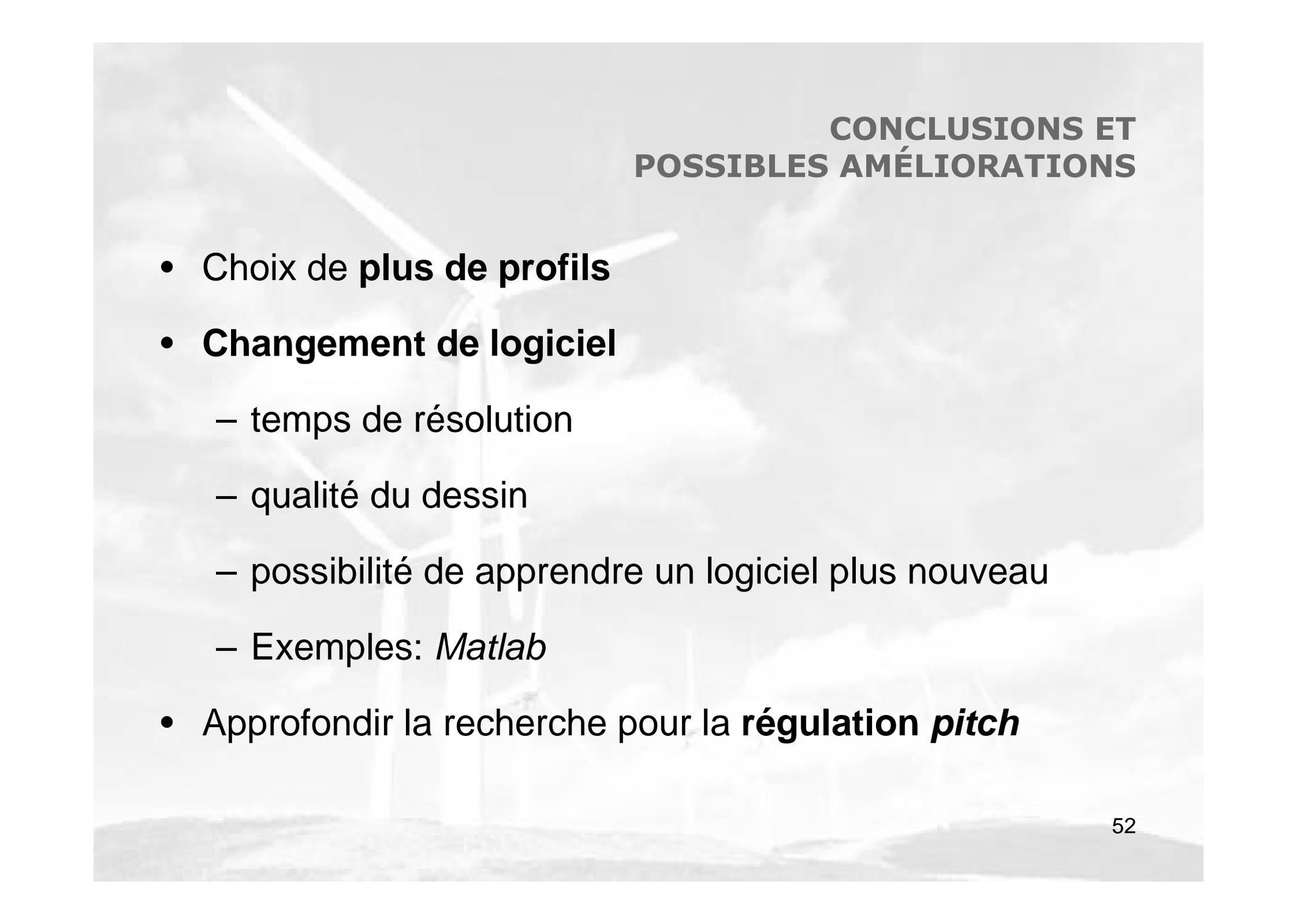


VÉRIFICATION DES RESULTATS

Fortis - Montana

- *Type régulation : Stall*
- *Longueur de la pale : 16 m*
- *Puissance nominale : 5800 W*
- *Vitesse moyenne : 8 m/s*
- *Vitesse démarrage : 3 m/s*
- *Vitesse nominal : 14 m/s*
- *Rendement = 0.7*
- $\lambda = 7$





CONCLUSIONS ET POSSIBLES AMÉLIORATIONS

- Choix de **plus de profils**
- **Changement de logiciel**
 - temps de résolution
 - qualité du dessin
 - possibilité de apprendre un logiciel plus nouveau
 - Exemples: *Matlab*
- Approfondir la recherche pour la **régulation *pitch***

CONCLUSIONS ET POSSIBLES AMÉLIORATIONS

- La recherche: Reynolds, **Mach**
- La théorie mathématique
- L'expérience avec la petite éolienne
- Étude économique

Ce programme n'a pas la vocation de dimensionner précisément une éolienne, il s'agit d'un outil pratique de pré dimensionnement et d'analyse des interactions entre les différents paramètres de modélisation

**MERCI PAR
VOTRE ATTENTION!**

