

# 2. DIMENSIONNEMENT AERODYNAMIQUE DES ROTORS D'EOLIENNE

## 2.1. NOTATIONS

$a$	$\Rightarrow$	facteur d'induction axial
$AR$	$\Rightarrow$	aspect ratio
$b$	$\Rightarrow$	facteur d'induction tangentiel
$C_d$	$\Rightarrow$	coefficient de traînée
$C_l$	$\Rightarrow$	coefficient de portance
$C_M$	$\Rightarrow$	composant tangentielle
$C_p$	$\Rightarrow$	coefficient de puissance
$C_T$	$\Rightarrow$	composant de poussée
$d$	$\Rightarrow$	distance entre deux nappes tourbillonnaires adjacentes dans la théorie de Prandtl (m)
$D$	$\Rightarrow$	diamètre du rotor (m)
$F$	$\Rightarrow$	facteur de correction de l'extrémité de Prandtl
$F_M$	$\Rightarrow$	force motrice (tangentielle) (N)
$F_T$	$\Rightarrow$	poussée axiale (N)
$l$	$\Rightarrow$	longueur de corde (m)
$M_f$	$\Rightarrow$	moment de flexion (N.m)
$p$	$\Rightarrow$	nombre de pales
$P$	$\Rightarrow$	puissance (W)
$Q_M$	$\Rightarrow$	couple moteur (N.m)
$Q_T$	$\Rightarrow$	couple de poussée (N.m)
$r$	$\Rightarrow$	rayon local (m)
$R$	$\Rightarrow$	rayon du rotor (m)
$R_x$	$\Rightarrow$	force en direction normal au flux (N)
$R_z$	$\Rightarrow$	force en direction du flux (N)
$V$	$\Rightarrow$	vitesse du vent (m/s)
$V_{ax}$	$\Rightarrow$	vitesse axiale (m/s)
$V_{tan}$	$\Rightarrow$	vitesse tangentielle (m/s)
$W$	$\Rightarrow$	vitesse relative du vent (m/s)
$x$	$\Rightarrow$	rapport du fonctionnement local $\left( = \frac{\Omega r}{V} \right)$
$x$	$\Rightarrow$	coordonnée dans la direction du vent
$y$	$\Rightarrow$	coordonnée latérale perpendiculaire au vent
$z$	$\Rightarrow$	coordonnée verticale
$\alpha$	$\Rightarrow$	angle d'incidence (°)

$\alpha_s$	$\Rightarrow$	angle d'incidence « stall » (°)
$\beta$	$\Rightarrow$	angle de calage (°)
$\phi$	$\Rightarrow$	angle du vent relatif (°)
$\phi_t$	$\Rightarrow$	angle de l'hélicoïde à l'extrémité de la pale (°)
$\lambda$	$\Rightarrow$	rapport de fonctionnement $\left( = \frac{\Omega R}{V} \right)$
$\rho$	$\Rightarrow$	densité de l'air (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	$\Rightarrow$	solidité
$\Omega$	$\Rightarrow$	vitesse angulaire du rotor (rad/s)

## **2.2. INTRODUCTION**

Le sillage d'une éolienne se compose d'un écoulement à pression génératrice différente de celle de l'écoulement amont. Dans un écoulement de fluide parfait, la discontinuité de pression génératrice peut se représenter par une nappe tourbillonnaire. Le mode de génération de ce rotationnel et de sa géométrie aide beaucoup la modélisation de l'écoulement.

Dans les modélisations fines du sillage, on se donne la géométrie du sillage et la distribution de rotationnel, la loi de Biot-Savart sert ensuite à calculer le champ de vitesse puis la pression dans le sillage afin de déterminer son équilibre. Ainsi la solution appropriée en fluide parfait doit impliquer la cinématique et la dynamique de l'écoulement. En d'autres termes, la forme et l'intensité du sillage sont déterminés par un procédé itératif où l'intensité et la géométrie initiale sont imposées, puis l'écoulement induit est adapté pour assurer la compatibilité de propriétés physiques du sillage.

Une méthode précise qui est fréquemment utilisée pour le calcul des performances des rotors d'hélices, est de considérer l'écoulement à travers le rotor comme des tubes de courant indépendants. Cette méthode est désignée sous le nom de Théorie tourbillonnaire de Glauert.

## 2.3. THEORIE TOURBILLONNAIRE DE GLAUERT [4]

### 2.3.1. THEORIE DE GLAUERT

On suppose que l'écoulement est bidimensionnel par tranche radiale lorsque le nombre de pales tend vers l'infini, la circulation d'une pale élémentaire tend vers zéro et la circulation totale du disque reste finie.

On commence en regardant le triangle des vitesses d'un élément de pale (Fig. 2.1) :

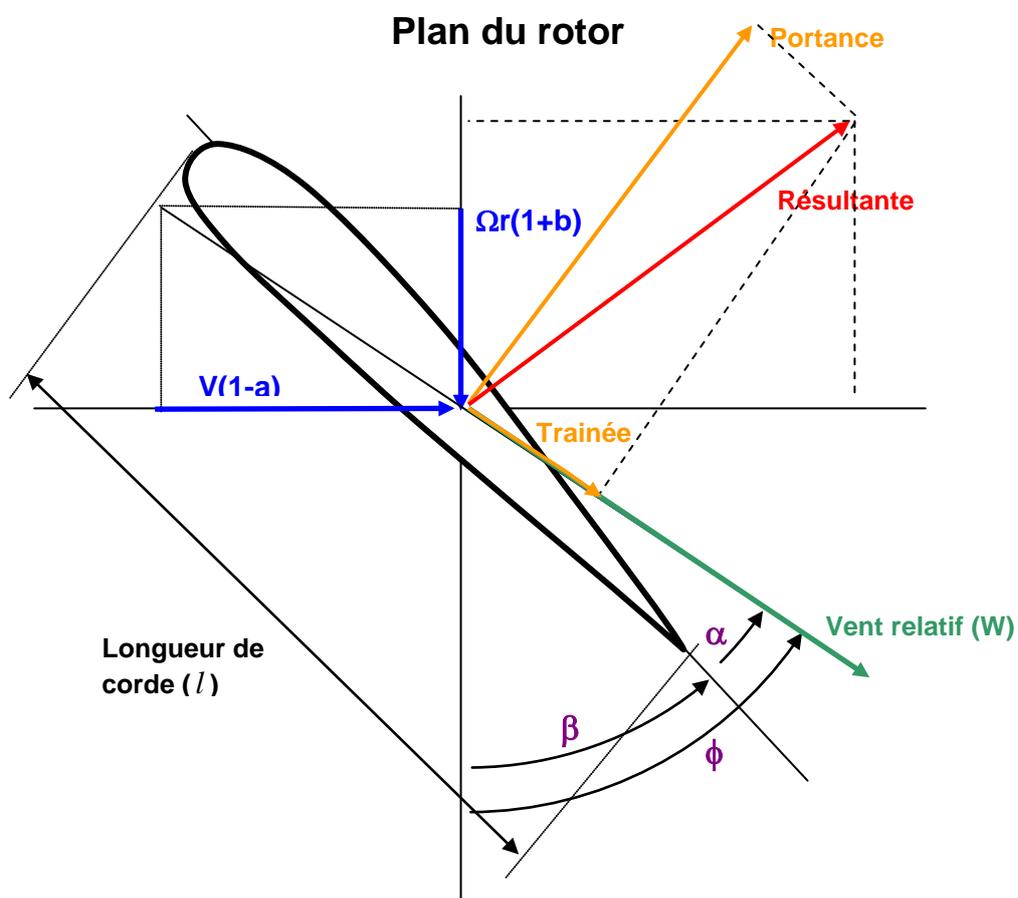


Fig. 2.1. Triangle de vitesses

$\phi$  : angle du vent relatif avec le plan de rotation [rad].

$\beta$  : angle de calage du profil [rad].

$\alpha$  : angle d'incidence [rad].

Le plan du rotor est le plan que forment les axes x et y, ainsi le plan de rotation est dans la direction x et la direction y est normale à l'axe de la pale vers l'aval.

Dans le plan du rotor, la vitesse axiale  $v_\infty$  et tangentielle  $\Omega \cdot r$  à un rayon "r" sont réduites à:

$$V_{ax} = (1 - a) \cdot V \quad (2.1)$$

$$V_{tan} = (1 + b) \cdot \Omega \cdot r \quad (2.2)$$

où « a » et « b » sont les facteurs d'induction axial et tangentielle.

Lorsqu'on suppose un sillage cylindrique, les vitesses induites à l'infini aval sont deux fois les valeurs de celles dans le plan du rotor selon la théorie de Betz [5] :

$$V_{ax\infty} = (1 - 2a) \cdot V \quad (2.3)$$

$$V_{tan\infty} = (1 + 2b) \cdot \Omega \cdot r \quad (2.4)$$

De la fig.2.1, on peut tirer les relations :

$$\tan \phi = \frac{(1 - a)}{(1 + b)} \cdot \frac{V}{\Omega r} \quad (2.5)$$

$$\phi = \beta + \alpha \quad (2.6)$$

où  $\phi$  : angle du vent relatif avec le plan de rotation [rad].

$\beta$  : angle de calage du profil [rad].

$\alpha$  : angle d'incidence [rad].

On peut alors calculer l'intensité du vent relatif et la direction (Eq. 2.5) :

$$W = \sqrt{V_{ax}^2 + V_{tan}^2} \quad (2.7)$$

#### PORTANCE ET TRAINEE D'UN PROFIL :

Quand on a un profil de pale, la portance ( $C_l$ ) et la traînée ( $C_d$ ) sont les coefficients adimensionnels de force en direction normale à la direction d'incidence du flux et en direction du flux respectivement. La somme vectorielle de ces deux coefficients nous donne le coefficient

de force et sa direction. La portance et la trainée sont connues par les résultats expérimentaux, par exemple dans les tables NACA. Ces résultats sont présentés sous forme adimensionnelle :

$$C_d = \frac{R_z}{\frac{\rho}{2} \cdot l \cdot V^2} \quad (2.8)$$

$$C_l = \frac{R_x}{\frac{\rho}{2} \cdot l \cdot V^2} \quad (2.9)$$

où :  
 $\rho$  : densité du fluide  
 $R_z$  : force en direction du flux  
 $R_x$  : force en direction normal au flux  
 $V$  : vitesse du flux

Les résultats des coefficients de portance et de trainée sont donnés en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  ». On peut voir un exemple de ces coefficients dans l'annexe 3.

### FORCES

On compose les forces au niveau des coefficients. La portance et la trainée donnent une résultante qui se projette en une composante poussée «  $C_T$  », et une composante tangentielle «  $C_M$  » :

$$C_T = C_l \cdot \cos \phi + C_d \cdot \sin \phi \quad (2.10)$$

$$C_M = C_l \cdot \sin \phi - C_d \cdot \cos \phi \quad (2.11)$$

Si on sait calculer l'incidence aérodynamique «  $\alpha$  » en tout rayon de la pale, on peut en déduire immédiatement le coefficient de portance «  $C_l$  » et le coefficient de trainée «  $C_d$  », et après on peut passer aux forces. Si pour chaque rayon «  $r$  » on connaît «  $W$  » en module et en direction «  $\phi$  », on peut obtenir, à partir des relations (2.10) et (2.11) :

$$dR_z = C_l \cdot \frac{\rho}{2} \cdot l \cdot W^2 \cdot dr \quad (2.12)$$

$$dR_x = C_d \cdot \frac{\rho}{2} \cdot l \cdot W^2 \cdot dr \quad (2.13)$$

qui se composent dans la direction axiale, en une poussée élémentaire «  $dF_T$  » et dans la direction tangentielle, en une force «  $dF_M$  », qui fournira un couple élémentaire «  $dQ_M$  » :

$$dF_T = dR_z \cdot \cos \phi + dR_x \cdot \sin \phi \quad (2.14)$$

$$dF_M = dR_z \cdot \sin \phi - dR_x \cdot \cos \phi \quad (2.15)$$

$$dQ_M = r \cdot dM \quad (2.16)$$

Par intégration le long de la pale, et pour les  $p$  pales de la machine, on obtient ainsi, la poussée axiale «  $F_T$  », le couple de poussée «  $Q_T$  », la force motrice «  $F_M$  », le couple moteur «  $Q_M$  », la puissance «  $P$  » et le moment de flexion «  $M_f$  ».

$$F_T = p \cdot \int_0^R dF_T \quad (2.17)$$

$$Q_T = p \cdot \int_0^R r \cdot dF_T \quad (2.18)$$

$$F_M = p \cdot \int_0^R dF_M \quad (2.19)$$

$$Q_M = p \cdot \int_0^R r \cdot dF_M \quad (2.20)$$

$$P = \Omega \cdot Q_M = p \cdot \Omega \cdot \int_0^R r \cdot dF_M \quad (2.21)$$

$$M_f = \sqrt{Q_T^2 + Q_M^2} \quad (2.22)$$

### CALCUL DE « a » ET « b »

Pour le calcul de « a » et « b » il faut introduire deux relations qu'on va déduire du théorème des quantités de mouvement appliqué dans la direction axiale et dans la direction tangentielle sur un anneau de rayon «  $r$  » et de largeur «  $dr$  ». Le vent est considéré stable, homogène et isotrope à l'infini amont. Ce flux est ensuite influencé par le rotor. La poussée sur le rotor et le couple moteur sont ainsi respectivement responsable du ralentissement axial du vent et de l'induction de vitesse tangentielle qui tend à majorer la composante d'entraînement du vent relatif.

Axialement, le débit de masse est :

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

d'où la variation de quantité de mouvement entre l'infini amont et l'infini aval (même pression) :

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

et la force appliquée par les « p » pales :

$$p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W^2 \cdot l \cdot C_T \cdot dr$$

d'où

$$V^2 \cdot 8\pi r \cdot a \cdot (1-a) = p \cdot W^2 \cdot l \cdot C_T$$

si on regarde la fig. 1 on a :

$$\frac{V \cdot (1-a)}{W} = \sin \phi$$

alors on a finalement :

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{p \cdot l \cdot C_T}{8\pi r \cdot \sin^2 \phi} \quad (2.23)$$

Le moment de quantité de mouvement autour du centre de l'hélice permet de même d'écrire :

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

et avec

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

soit

$$\frac{b}{(1+b)} = \frac{p \cdot l \cdot C_M}{4\pi r \cdot \sin 2\phi} \quad (2.24)$$

Les expressions ci-dessus nécessitent quelques modifications. Un écoulement récirculatoire peut apparaître pour  $a > 1/2$  comme on le voit dans l'équation (2.3). L'analyse ci-dessus n'est pas compatible avec les hypothèses et doit être modifiée.

### 2.3.2 CORRECTION DE CIRCULATION DE PRANDTL

L'idée de base est d'introduire la différence entre la nappe de tourbillons aval cylindrique dans l'hypothèse du nombre infini de pales et celle, déformée par les vitesses induites, qu'on aura pour un nombre fini de pales.

L'écoulement, à chaque position radiale est bidimensionnel. La circulation autour des pales diminue continuellement et tend vers zéro à l'extrémité, à cause du contournement de l'extrémité qui fait diminuer la différence de pression de part et d'autre du profil. Au voisinage des extrémités des pales le fluide tend à contourner l'hélicoïde d'extrémité de pale et il apparaît des vitesses radiales non négligeables.

Prandtl [6] propose de représenter les nappes tourbillonnaires par une série de lignes parallèles à la distance :

$$d = \frac{2\pi(r/R)}{p} \cdot \sin \phi_t \quad (2.25)$$

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

On va remplacer l'écoulement correspondant à un nombre infini de pales (« d » très petit) par celui par un nombre fini de pales. L'écriture de cet écoulement sous forme d'un potentiel complexe fait apparaître une réduction de la vitesse, à la distance  $1 - r/R$  de

$$\text{l'extrémité de } \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp\left(-\frac{\pi \cdot (1 - (r/R))}{d}\right) \right].$$

On appelle facteur de réduction de la circulation de Prandtl le facteur :

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} [\exp(-f)] \quad (2.26)$$

avec

$$f = \frac{\pi \cdot (1 - (r/R))}{d} = \frac{p}{2} \cdot \frac{1 - (r/R)}{\sin \phi_t} \quad (2.27)$$

Alors, pour le calcul des paramètres « a » et « b », on introduit sur les vitesses la correction pour le nombre fini de pales de Prandtl (Éq. 2.26) [7]

Glauert appelle solidité «  $\sigma$  » de l'élément de pale la quantité :

$$\sigma = \frac{p \cdot l}{2\pi r} \quad (2.28)$$

Les équations (2.23) et (2.24) sont ainsi remplacées par :

$$aF \cdot (1 - aF) = \frac{\sigma \cdot C_T}{4 \cdot \sin^2 \phi} \cdot (1 - a)^2 \quad (2.29)$$

$$\frac{b}{(1 + b)} = \frac{\sigma \cdot C_M}{2F \cdot \sin 2\phi} \quad (2.30)$$

### 2.3.3. METHODE NUMERIQUE

On dispose à présent d'une série d'équations. Ces équations forment une référence circulaire. On peut ainsi établir un calcul itératif pour calculer a et b. On doit connaître le nombre de pales de l'éolienne et la géométrie du rotor, c'est à dire, le rayon de la surface balayée par le rotor, la longueur de corde pour une section quelconque de la pale et l'angle de calage qu'on impose aux pales de l'éolienne. On doit connaître aussi le profil des pales pour avoir les coefficients de portance et traînée. Le calcul s'effectue de la façon suivante pour un rayon relatif «  $r/R$  » :

- 1) Données initiales : « a » et « b » (on peut partir de a = 0 et b = 0).
- 2) Calcul de l'angle du vent relatif «  $\phi$  » par l'équation (2.5).
- 3) Calcul de l'angle d'incidence «  $\alpha$  » par l'équation (2.6).
- 4) Calcul des coefficients de portance «  $C_l(\alpha)$  » et traînée «  $C_d(\alpha)$  ».
- 5) Calcul du facteur « F » de perte d'extrémité par (2.26).
- 6) Calcul des coefficients des forces tangentielles «  $C_M$  » et normales «  $C_T$  » par les équations (2.10) et (2.11).

- 7) Calcul de la solidité «  $\sigma$  » par l'équation (2.28).
- 8) Calcul des nouvelles valeurs de « a » et « b » par (2.29) et (2.30).
- 9) Comparaison des résultats avec les valeurs de « a » et « b » initiales et retour à l'étape 1) jusqu'à la convergence.

Une fois que le système converge, c'est-à-dire, quand le critère de convergence est atteint, on a déjà trouvé les bonnes valeurs de « a » et « b ». Alors, on peut calculer les efforts et la puissance de l'éolienne. On prend les relations (2.14) et (2.15) et on les écrit de la façon suivante :

$$\frac{dF_T}{dr} = 4\pi r \cdot \rho \cdot V^2 \cdot a(1-a) = \pi r \cdot \sigma \cdot \rho \cdot W^2 \cdot C_T = \frac{1}{2} \cdot p \cdot l \cdot \rho \cdot W^2 \cdot C_T \quad (2.31)$$

$$\frac{dF_M}{dr} = 4\pi r^2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \Omega \cdot b(1-a) = \pi r \cdot \sigma \cdot \rho \cdot W^2 \cdot C_M = \frac{1}{2} \cdot p \cdot l \cdot \rho \cdot W^2 \cdot C_M \quad (2.32)$$

Puis, on introduit (2.31) et (2.32) dans les équations de la poussée, de la force motrice, des couples, et de la puissance (2.17), (2.18), (2.19), (2.20) et (2.21), et on change l'intégrale par une somme des valeurs pour un rayon relatif quelconque. On a finalement :

$$F_T = \sum_{i=0}^{i=n-1} \frac{1}{2} \cdot p \cdot l \cdot \rho \cdot \frac{(W_i^2 \cdot C_{Ti} + W_{i+1}^2 \cdot C_{Ti+1})}{2} \cdot (r_{i+1} - r_i) \quad (2.33)$$

$$F_M = \sum_{i=0}^{i=n-1} \frac{1}{2} \cdot p \cdot l \cdot \rho \cdot \frac{(W_i^2 \cdot C_{Mi} + W_{i+1}^2 \cdot C_{Mi+1})}{2} \cdot (r_{i+1} - r_i) \quad (2.34)$$

$$Q_T = \sum_{i=0}^{i=n-1} \frac{1}{2} \cdot p \cdot l \cdot \rho \cdot \frac{(W_i^2 \cdot C_{Ti} \cdot r_i + W_{i+1}^2 \cdot C_{Ti+1} \cdot r_{i+1})}{2} \cdot (r_{i+1} - r_i) \quad (2.35)$$

$$Q_M = \sum_{i=0}^{i=n-1} \frac{1}{2} \cdot p \cdot l \cdot \rho \cdot \frac{(W_i^2 \cdot C_{Mi} \cdot r_i + W_{i+1}^2 \cdot C_{Mi+1} \cdot r_{i+1})}{2} \cdot (r_{i+1} - r_i) \quad (2.36)$$

$$P = \Omega \cdot Q_M \quad (2.37)$$

## **2.4. DIMENSIONNEMENT DU ROTOR**

Les dimensions des pales d'un rotor d'éolienne sont une des choses les plus importantes dans une éolienne. Les fabricants d'éoliennes réalisent beaucoup de calculs et études pour trouver les pales qui s'adaptent de la meilleure façon possible à leurs nécessités.

Il n'existe pas de modèle mathématique qui nous donne la pale optimale directement. Il faut faire une première étude pour trouver des premières dimensions, et après réaliser beaucoup d'essais pour trouver la bonne pale et qui ne soit trop chère.

### **2.4.1. ROTOR OPTIMAL**

Il y a plusieurs théories pour obtenir un rotor optimal. Glauert [8] a développé un modèle simple pour calculer le rotor optimal.

Glauert a présenté une analyse d'un élément de pale qui néglige la traînée du profil. Cette approximation a été corrigée par H.J. Steward [9], qui a inclus les effets de la traînée. De cette façon, on peut considérer l'analyse de Glauert comme une partie de l'analyse de Steward pour le cas d'un coefficient portance/traînée infini.

Mais l'analyse de Glauert est très bonne pour réaliser une conception primaire du rotor de l'éolienne, et il n'y a pas de grandes différences entre les résultats des deux modèles. Dans un bon design d'un rotor avec un bon profil, le coefficient portance/traînée est très grand, environ 100, alors, on peut négliger le coefficient de traînée pour trouver la pale optimale.

Le résultat de la théorie de Glauert ou de Steward contient le produit «  $c \cdot C_l$  » (c'est à dire, le produit entre la longueur de corde et le coefficient de portance) dans un segment quelconque de pale comme fonction du paramètre lambda local. Cette théorie est très utile pour un premier design. Cependant, elle ne nous donne pas d'information pour les conditions de fonctionnement situées en dehors des conditions optimales.

#### **2.4.1.1. Calcul du rotor [10]**

Pour obtenir le produit «  $l \cdot C_l$  » on commence en rappelant la théorie de Glauert q'on a vu auparavant pour calculer les efforts et la puissance des éoliennes.

On avait les équations (2.23) et (2.24) pour le calcul des paramètres « a » et « b » :

En supposant que le coefficient de traînée est zéro, et en divisant l'équation (2.24) par la (2.23) on a :

$$\frac{b \cdot (1-a)}{a \cdot (1+b)} = \tan^2 \phi \quad (2.38)$$

On sait aussi que l'angle du vent relatif, «  $\phi$  », suit la relation :

$$\tan \phi = \frac{V \cdot (1-a)}{\Omega \cdot r \cdot (1+b)} = \frac{(1-a)}{x \cdot (1+b)} \quad (2.39)$$

Si on combine ces deux dernières formules on obtient ;

$$\frac{b \cdot (1+b)}{a \cdot (1-a)} = \frac{V^2}{\Omega^2 \cdot r^2} = \frac{1}{x^2} \quad (2.40)$$

Pour un rayon quelconque, la valeur «  $\frac{1}{x^2}$  » est constante, alors le côté gauche de l'équation précédente est aussi constant. On peut alors obtenir la relation suivante entre les coefficients « a » et « b ».

$$b = \frac{(1-3 \cdot a)}{(4 \cdot a - 1)} \quad (2.41)$$

Les paramètres « a » et « b » doivent rester toujours positives. Pour des valeurs petites de « x », « a » approche 1/4 et « b » devient grand. Et pour des valeurs grandes de « x », « a » approche 1/3 et « b » approche zéro.

Si on substitue « b » de l'équation (2.41) dans l'équation (2.40), on obtient la relation entre « a » et le coefficient local « x » :

$$x = (4 \cdot a - 1) \cdot \sqrt{(1-a)/(1-3 \cdot a)} \quad (2.42)$$

Miller [11] donne une série de «  $\frac{1}{x^2}$  » comme approximation pour la relation inverse:

$$a \cong \left(\frac{1}{3}\right) - \left(\frac{2}{81 \cdot x^2}\right) + \left(\frac{10}{729 \cdot x^4}\right) - \left(\frac{418}{59049 \cdot x^6}\right) + \dots \quad (2.43)$$

L'angle correspondant du vent relatif, «  $\phi$  », peut être obtenu grâce à l'équation (3) :

$$\tan \phi = (1 - a) \cdot \sqrt{(1 - a)/(1 - 3 \cdot a)} \quad (2.44)$$

En dernier lieu, avec les équations (2.38) et (2.39), et les relations de « a », « b » et «  $\phi$  » comme fonction de « x », on a le produit «  $l \cdot C_l$  », et un paramètre adimensionnel de l'élément de pale «  $\frac{p \cdot l \cdot \Omega \cdot C_l}{2 \cdot \pi \cdot V}$  » :

$$\frac{p \cdot \Omega}{8 \cdot \pi \cdot V} \cdot (l \cdot C_l) = \left[ \frac{(4 \cdot a - 1)}{(1 - 2 \cdot a)} \right] \cdot \sqrt{(1 - a) \cdot (1 - 3 \cdot a)} \quad (2.45)$$

Les variations des paramètres « x », « a », « b », «  $\phi$  » et le paramètre de l'élément de pale sont dans le tableau 2.1 :

<b>x</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b><math>\frac{p \cdot l \cdot \Omega \cdot C_l}{2 \cdot \pi \cdot V}</math></b>
0.25	0.280	1.364	50.6	0.3658
0.50	0.298	0.543	42.3	0.5205
0.75	0.310	0.294	35.4	0.5552
1.00	0.317	0.183	30	0.5359
1.25	0.322	0.124	25.8	0.4974
1.50	0.324	0.089	22.5	0.4551
1.75	0.326	0.067	19.8	0.4151
2.00	0.328	0.052	17.7	0.3791
2.50	0.330	0.034	14.5	0.3200
3.00	0.331	0.024	12.3	0.2750
3.50	0.331	0.018	10.6	0.2403
4.00	0.332	0.014	9.4	0.2129
4.50	0.332	0.011	8.4	0.1909
5.00	0.332	0.009	7.5	0.1729
5.50	0.332	0.007	6.9	0.1580
6.00	0.333	0.006	6.3	0.1453
7.00	0.333	0.004	5.4	0.1252
8.00	0.333	0.004	4.8	0.1099
9.00	0.333	0.003	4.2	0.0979
10.00	0.333	0.002	3.8	0.0883
11.00	0.333	0.002	3.5	0.0803
12.00	0.333	0.002	3.2	0.0737

Tableau 2.1. Calcul du rotor optimal

Pour déterminer une pale optimale on doit connaître tous les termes de l'équation (10), c'est à dire, le nombre de pales (et le profil des pales de notre éolienne), la vitesse de rotation de l'éolienne, la vitesse du vent optimal et le coefficient de fonctionnement «  $\lambda$  » à partir duquel on peut calculer « x » pour un rayon relatif quelconque.

Selon le profil qu'on a choisi pour notre éolienne, on aura une distribution du ratio portance - trainée en fonction de l'angle d'incidence. Pour avoir des conditions optimales on a besoin d'un rapport portance-trainée le plus grand possible, qui nous donne le couple moteur et la puissance optimal.

Alors, la longueur de corde peut être obtenue grâce à l'équation (2.45) avec «  $C_l$  » le coefficient de portance qui nous donne le ratio portance-trainée le plus grand possible.

On peut calculer aussi l'angle de calage de la pale à partir de la relation :

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

On connaît l'angle de vent relatif «  $\phi$  » de l'équation (2.5) et l'angle d'incidence «  $\alpha$  » est l'angle qui rend le ratio portance-trainée le plus grand possible.

#### 2.4.1.2. Exemple du calcul de rotor optimal

Pour illustrer l'usage de cette théorie on va considérer une éolienne de 100 KW de puissance nominale. L'éolienne a 3 pales et fonctionne avec un coefficient «  $\lambda$  » égal à 6. La densité de l'air est de  $1,25 \text{ kg/m}^3$  et la vitesse du vent optimale pour cette éolienne est 9 m/s.

Les pales de l'éolienne ont un profil NACA 0012. On peut voir la distribution du coefficient de portance et de trainée, pour un nombre de Reynolds de  $Re = 2 \cdot 10^6$  dans l'annexe 3.

À partir des valeurs de la puissance, du nombre de pales, de la densité de l'air, de la vitesse du vent optimal et du coefficient «  $\lambda$  » on peut obtenir avec l'équation (1.4) et en supposant que la courbe de puissance de l'éolienne est une ligne droite du démarrage jusqu'à la puissance nominale, les valeurs de la puissance récupérée avec la vitesse optimale, la vitesse de rotation du rotor et le rayon de l'éolienne.

Et finalement en appliquant les équations qu'on a montré dans ce chapitre on obtient les valeurs de la longueur de corde et l'angle de calage. Tous ces calculs sont dans les tableaux suivants :

Nombre de Pales	3
Densité de l'air [kg/m <sup>3</sup> ]	1,250
Puissance Nominale [W]	100000
Vitesse du Vent optimal [m/s]	9
Puissance récupérée [W]	48000
$\lambda_{opt}$	6
Rayon de l'éolienne [m]	8,74
Vitesse de Rotation du Rotor [rad/s]	6,18

Tableau 2.2. Calcul du rotor optimal

Rayon Relatif	$x = \lambda \cdot r/R$	a	b	Angle Vent Relatif [°]
0,15	0,9	0,3238	0,0974	23,29
0,25	1,5	0,3251	0,0826	21,70
0,35	2,1	0,3284	0,0468	16,82
0,45	2,7	0,3302	0,0293	13,50
0,55	3,3	0,3312	0,0199	11,22
0,65	3,9	0,3318	0,0143	9,58
0,75	4,5	0,3321	0,0108	8,35
0,85	5,1	0,3324	0,0085	7,39
0,95	5,7	0,3326	0,0068	6,63
0,99	5,94	0,3326	0,0063	6,37

Angle d'incidence [°]	Coef. Portance	Coef. Traînée	Corde [m]	Angle de calage [°]
9	0,9829	0,0115	1,449	14,29
9	0,9829	0,0115	1,379	12,70
9	0,9829	0,0115	1,128	7,82
9	0,9829	0,0115	0,931	4,50
9	0,9829	0,0115	0,785	2,22
9	0,9829	0,0115	0,676	0,58
9	0,9829	0,0115	0,593	-0,65
9	0,9829	0,0115	0,527	-1,61
9	0,9829	0,0115	0,474	-2,37
9	0,9829	0,0115	0,456	-2,63

Tableau 2.3. Calcul du rotor optimal

En regardant la graphique du ratio portance-traînée en fonction de l'angle d'incidence, on voit que l'angle qui donne le ratio le plus élevé est 9°.

On peut voir, dans les cellules en bleu, la distribution de la longueur de corde et de l'angle de calage pour quelque rayon relatif de la pale. Ces calculs ont été faits dans une feuille excel. On pourrait changer les valeurs de la puissance nominale, la vitesse optimale du vent, la densité de l'air et le nombre de pales et on aurait automatiquement une autre distribution optimale pour la longueur de corde et l'angle de calage.

Il faut remarquer que la longueur de corde et l'angle de calage que l'on a obtenu dans ce chapitre nous donnent le meilleur rendement pour la vitesse du vent optimal, mais on ne connaît pas leur comportement aux autres vitesses de vent.

Cette théorie peut être utilisée pour un premier dimensionnement des pales de l'éolienne et à partir de ce dimensionnement, les constructeurs de pales d'éoliennes font beaucoup d'essais en soufflerie dans un tunnel pour améliorer la performance de la pale et pour trouver le meilleur dimensionnement pour toutes les vitesses du vent. Les constructeurs réalisent aussi des essais avec différents profils.

Finalement, on ne peut pas oublier qu'il faut trouver un compromis entre les meilleures valeurs de l'angle de calage et la distribution de la longueur de corde de la pale, et la difficulté de construction de la pale. Les distributions de l'angle de calage et de la longueur de corde qu'on peut trouver théoriquement peuvent être très compliquées de construire. Ça veut dire que l'on doit trouver une pale qui nous donne un bon rendement, mais qui ne soit pas trop chère à construire. Bien des fois les constructeurs d'éoliennes préfèrent perdre un peu de rendement et de puissance et avoir une pale plus facile à construire et beaucoup moins chère.

### 2.4.2 CHOIX DU PROFIL

Le choix d'un bon profil de pale est très important pour que notre éolienne fonctionne comme on veut. Les fabricants d'éoliennes ou de pales font beaucoup d'essais en soufflerie pour trouver les profils les plus favorables pour leurs besoins. La fabrication des pales des éoliennes est très chère, alors il faut trouver la pale qui nous fournira le plus de puissance possible et qui ne soit pas trop chère à construire.

Les profils utilisés pour fabriquer les éoliennes sont des profils d'aéronautique qui ont été utilisés pour les pales des éoliennes. Ce sont les profils NACA, Gottingen, Eppler,...

La construction d'éoliennes est relativement récente. Il y a quelques années il n'y avait pas d'éoliennes à construire. Alors, on prend les polaires des profils qu'il y avait pour les ailes d'avions, etc. Mais, il est très difficile de trouver des polaires au-delà du point de décrochage parce que dans l'aéronautique ils ne sont d'aucune utilité. Les polaires sont calculées seulement pour quelques angles d'incidence, (jusqu'à environ 15°) car ils ne sont pas utilisés avec des angles plus élevés. Ensuite, après la limite de décrochage c'est très difficile à réaliser car on passe en régime instationnaire.

À cause de la difficulté de trouver les polaires pour toutes les incidences, les fabricants de pales et éoliennes ne divulguent pas leurs résultats en soufflerie car les autres entreprises pourraient les copier.

D'autre part, normalement, le profil change le long de la pale. On n'a pas le même profil pour les sections de la pale aux extrémités et pour les sections près du moyeu qui sont les plus chargées. Alors, il est très difficile de trouver les données des polaires (coefficients de portance et traînée) pour une vraie pale qui est utilisée dans une éolienne car c'est un secret d'entreprise.

Il faut remarquer aussi que selon le type d'éolienne (stall ou pitch) les pales à utiliser peuvent être différentes. Il existe des profils spécifiquement calculés pour les machines stall, mais un profil classique peut très bien fonctionner. Les profils symétriques avec peu de finesse (ratio portance/trainée) ne sont pas trop intéressants (comme le NACA 0012 [12], annexe 3). La précision des polaires et leur allure sont très importantes pour le résultat. Dans l'annexe 4 on peut voir différentes polaires pour plusieurs profils de pales.

Pour connaître des profils au-delà du point de décrochage on va utiliser un modèle post-stall comme le modèle Viterna-Corrigan.

#### 2.4.2.1. Modélisation stall

Des dernières années il y a eu un grand progrès dans la modélisation des conditions stall. Il est très difficile d'obtenir des données post-stall dans le tunnel du vent car, après le décrochage, le régime est instationnaire.

Viterna et Corrigan [13] ont analysé le comportement dans la zone « post-stall ». Ils ont constaté que les sections des pales après le décrochage génèrent beaucoup de puissance, et ils ont cherché quelles valeurs des coefficients de portance et traînée donnaient une puissance constante, après stall, pour une pale avec des angles de calage égal à zéro.

L'approximation de Viterna-Corrigan est seulement une méthode expérimentale qui permet de calculer les coefficients de portance et traînée « post-stall » pour obtenir une puissance de sortie constante. Cette approximation est une façon facile de traiter un problème très complexe. Elle n'est pas exacte, mais elle est utile pour un premier design.

Les équations post-stall de Viterna-Corrigan sont données au-dessous. Il faut remarquer qu'elles sont faites pour une section de rotor avec angle de calage  $\beta = 0^\circ$  et elles

vont bien fonctionner après stall pour cette angle seulement. Si l'angle de calage est différent de zéro, il faut les modifier.

Dans la formulation de Viterna, le coefficient de traînée maximal est :

$$C_{d\max} = 1,11 + 0,018 \cdot AR \quad (2.46)$$

avec :

AR : aspect ratio,  $\frac{R}{l}$

Le coefficient de traînée post-stall est donné, pour  $15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  □ par :

$$C_d = B_1 \cdot \sin^2 \alpha + B_2 \cdot \cos \alpha \quad (2.47)$$

où :

$$B_1 = C_{d\max} \quad (2.48)$$

$$B_2 = \left( \frac{1}{\cos \alpha_s} \right) \cdot (C_{ds} - C_{d\max} \cdot \sin^2 \alpha_s) \quad (2.49)$$

$\alpha_s$  : angle d'incidence « stall »(°), (normalement  $\alpha_s = 15^\circ$ )

Le coefficient correspondant de portance est, pour  $15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  :

$$C_l = A_1 \cdot \sin^2 \alpha + A_2 \cdot \left( \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) \quad (2.50)$$

avec :

$$A_1 = \frac{B_1}{2} \quad (2.51)$$

$$B_2 = (C_{ls} - C_{d\max} \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s) \cdot \left( \frac{\sin \alpha_s}{\cos^2 \alpha_s} \right) \quad (2.52)$$

Dans un premier design, les équations de Viterna peuvent être utilisées, mais on doit connaître ses limites. Pour un travail exact, les bonnes données après stall d'un profil doivent être testées en soufflerie. La précision des polaires et leur allure sont très importantes pour les résultats. Dans l'annexe 4 on peut voir un exemple d'utilisation du modèle Viterna-Corrigan.

## **2.5. REALISATION DU PROGRAMME**

### **2.5.1. INTRODUCTION**

Le but de ce projet est la réalisation d'un programme qui, à partir d'une éolienne donnée avec régulation stall et vitesse de rotation constante, nous permettra de calculer ses puissance et couple pour toutes les vitesses du vent (courbe de puissance), ses efforts pour toute la pale, les coefficients de puissance... Cela nous permettrait optimiser le rotor de l'éolienne et comparer les différentes pales qu'on pourrait utiliser. Pour réaliser tous ces calculs, on utilise la théorie de Glauert.

La programmation de l'algorithme de Glauert qu'on a décrit dans le chapitre précédent est effectué sous Excel et VBA. Ce logiciel propose tous les outils dont on a besoin pour réaliser le programme : possibilité d'exécuter des calculs itératifs, distribution par cellules qui nous permettent de calculer toutes les équations intermédiaires, possibilité d'utiliser des macros pour les tâches répétitives, graphiques pour visualiser les courbes, utilisation de la programmation VBA dans la feuille Excel,... Le problème principal est la rapidité du traitement. Il faut faire beaucoup d'itérations et de calculs pour trouver une solution.

### **2.5.2. ORGANISATION DU PROGRAMME**

Le programme est structuré en 11 feuilles d'Excel. Il y a des feuilles pour montrer les résultats, et autres pour faire des calculs. Les feuilles pour faire des calculs sont la « Feuille0 », la « Feuille 1 », et la feuille « Polaires ». Les autres sont les feuilles qui montrent les résultats du programme. Ce sont les feuilles « Tableau 1, 2, 3 » et « Graphiques 1, 2, 3, 4 ».

#### Feuille « Polaires » :

Dans la feuille « **Polaires** » il y a des valeurs et des graphiques des coefficients de portance et traînée du profil utilisés par le programme, le NACA 63215. On a choisi ce profil car ce n'est pas un profil symétrique (pour les éoliennes Stall on utilise les profils non symétriques), et normalement, la série NACA 63xxx est utilisée pour les éoliennes Stall. On utilise ce profil tout au long de la pale. Comme on l'a vu, normalement le profil de la pale change, mais comme on n'a pas de données exactes d'une vraie pale (les fabricants ne donnent pas cette information) on va utiliser le profil NACA 63215 tout au long de la pale. On a fait le calcul des polaires de ce profil selon les corrélations de Viterna-Corrigan qu'on a vu dans le chapitre 2.4.2.1. On peut voir ces graphes dans l'annexe 3.

La feuille « Polaires » est celle qu'on utilise pour trouver les coefficients de portance et traînée pour les angles d'incidence qu'on a dans le programme et qu'on utilise dans les autres feuilles.

Feuille « Feuille0 » :

Dans la feuille « **Feuille0** » on cherche, selon les caractéristiques de l'éolienne à analyser, les valeurs de la distribution de la longueur de corde et de l'angle de calage tout au long de la pale. On les calcul comme dans le chapitre 2.4.1.

Feuille « Feuille1 » :

La feuille « Feuille1 » est la base du programme. La feuille est organisée comme suit :

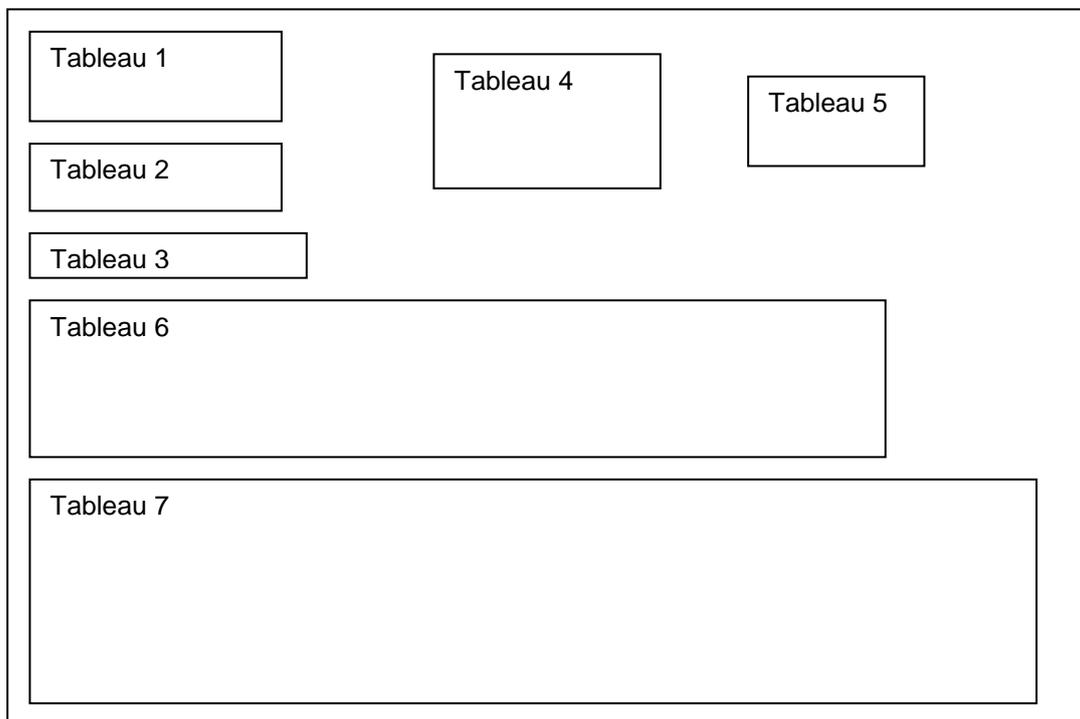


Fig. 2.2. « Feuille 1 » du programme.

Le tableau 1 contient les variables d'entrée générales de l'éolienne : nombre de pales, rayon de l'éolienne, vitesse du vent à l'optimum, vitesse du rotation du rotor, densité de l'air et puissance nominale. Ces valeurs sont fixes pour tout le calcul pour une éolienne déterminée.

Le tableau 3 rassemble les valeurs de la vitesse du vent pour les calculs et la valeur du rapport de fonctionnement local «  $x$  ».

Le tableau 6 contient les dimensions de la pale dans les trois premières colonnes, les variables intermédiaires du calcul de la théorie de Glauert et les résultats. La première colonne contient les rayons relatifs. On a choisi de définir dix sections en partant de  $\frac{r}{R} = 0,15$ . La deuxième et la troisième colonne contiennent les valeurs de l'angle de calage et de la longueur de corde. On les définit dans la feuille « Feuille0 » ou, dans le cas de l'angle de calage, ces données sont entrées par l'utilisateur du programme.

Les autres colonnes sont l'angle du vent relatif (calculé à partir des paramètres « a » et « b » du tableau 4), l'angle d'incidence, les coefficients de portance et de traînée (calculés dans la feuille « Polaires »), les composants de couple et de poussée et les valeurs des paramètres « a » et « b » finaux. Les quatre dernières colonnes sont les valeurs des puissances et des efforts. On donne aussi la puissance du vent et la puissance de Betz à titre de comparaison. Le coefficient de puissance ne peut donc pas théoriquement dépasser le coefficient de Betz ( $16/27 = 0,59$ ). Suit enfin la valeur du couple moteur. Toutes les colonnes sont calculées en suivant les équations de la méthode de Glauert.

Le tableau 2 rassemble les résultats principaux du tableau 6 pour plus de lisibilité. Ces résultats sont : la puissance développée, le coefficient de puissance, une variable booléenne indiquant si le système a entièrement convergé, et enfin le moment de flexion à la base de la pale.

Le tableau 4 rassemble les paramètres « a » et « b » utilisés pour le calcul initial de quelques itérations. Les valeurs finales des paramètres « a » et « b » calculées dans le tableau 6 vont au tableau 4 pour recommencer le calcul jusqu'à la convergence. Ce calcul est fait grâce à une macro (voir annexe 4). La troisième colonne de cette table sert de test pour vérifier la convergence. Si la différence entre les valeurs du tableau 6 et celle de la ligne correspondante dans le tableau 4 est inférieure à 0'0001 alors on considère que « a » et « b » ont convergé et la case n'affiche plus 1 mais 0. Une case supplémentaire fait la somme des tests de convergence Elle permet de mesurer l'étendue de la divergence s'il y a lieu.

Le tableau 5 donne les résultats du moment de flexion, de la poussée axiale, du couple de poussée, de la force « Fyb » et du couple moteur du tableau 6 pour plus de lisibilité.

Le tableau 7 permet de capitaliser, grâce à une macro (annexe 4), les informations sur les calculs pour différentes vitesses du vent. Elle sert ensuite à tracer toutes les courbes. La première colonne donne la valeur du rapport de fonctionnement «  $\lambda$  ». La deuxième colonne donne la vitesse du vent. Les neuf colonnes suivantes contiennent les puissances de chaque section. La douzième donne la puissance totale, les restantes donnent les valeurs des efforts et

des couples pour quelques vitesses. Il y a aussi une colonne qui montre l'étendue de la divergence s'il y a lieu.

Feuilles des résultats :

Il y a quatre feuilles de graphiques (« graphique 1, 2, 3, 4 ») et trois feuilles de tableaux (« tableau 1, 2, 3) avec résultats des calculs du programme. Les graphiques montrent les valeurs de la puissance totale, la puissance en une section quelconque, le coefficient de puissance, le couple moteur et la poussée axiale en fonction de la vitesse du vent.

Le « tableau1 » montre les caractéristiques générales de l'éolienne pour une vitesse qu'on aura choisie. Le « tableau 2 » donne les puissances des sections de la pale en fonction de la vitesse du vent et le « tableau 3 » montre les efforts aérodynamiques en fonction de la vitesse du vent.

### 2.5.3. UTILISATION DU PROGRAMME

On va à présent montrer, l'utilisation que l'on peut faire du programme. La première feuille du programme est la feuille de démarrage (Fig. 2.3.):

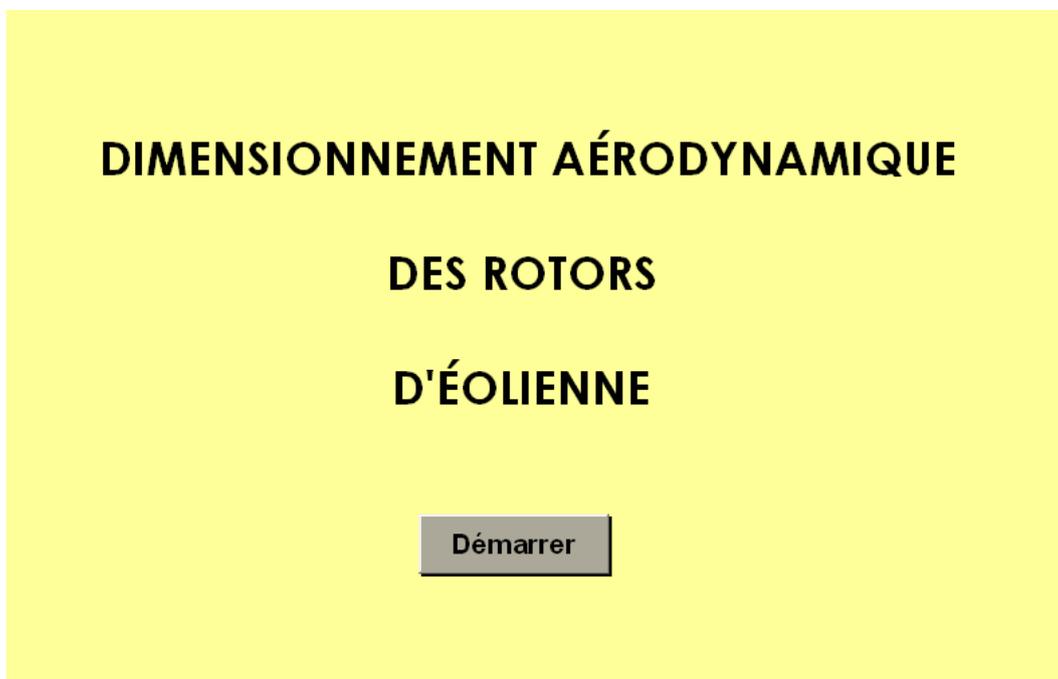
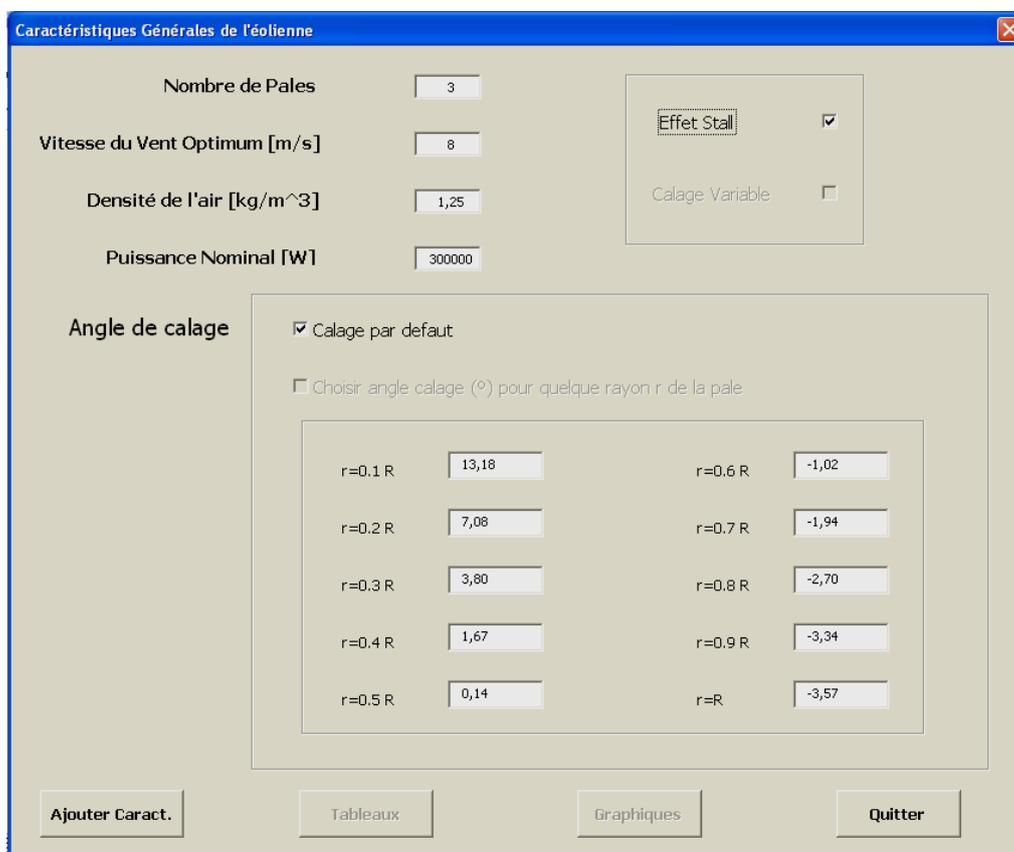


Fig.2.3. Feuille de démarrage du programme.

Dans cette feuille il y a un bouton « Démarrer » qui fait apparaître la première feuille (Fig. 2.4.).

Dans la feuille de la Fig. 2.4. on doit ajouter les caractéristiques de l'éolienne, c'est-à-dire, le nombre de pales, la vitesse du vent à l'optimum, la densité de l'air et la puissance nominale. On choisit entre la régulation par effet Stall ou la régulation par pas variable, « calage variable », (le programme calcule seulement les éoliennes Stall, mais on ajoute la possibilité de le développer pour un pas variable). Le programme donne aussi comme possibilité le choix des angles de calage par défaut (calculés comme dans le chapitre 2.4.1.) ou introduire les angles que l'utilisateur veut pour un rayon relatif quelconque, comme par exemple une distribution de l'angle de calage du type  $\beta = 11,38 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{-0,478} - 15$  (°) [4]



Rayon relatif (r)	Angle de calage (°)
r=0.1 R	13,18
r=0.2 R	7,08
r=0.3 R	3,80
r=0.4 R	1,67
r=0.5 R	0,14
r=0.6 R	-1,02
r=0.7 R	-1,94
r=0.8 R	-2,70
r=0.9 R	-3,34
r=R	-3,57

Fig. 2.4. « Caractéristiques Générales de l'éolienne »

Une fois que l'on a rempli toutes les données, on clique le bouton « Ajouter Caract. » pour que le programme sauvegarde les choix. Le bouton « Quitter » est là seulement pour masquer cette feuille et retourner dans la première feuille « Démarrer ». Si on n'a pas tout rempli, le programme envoie le message de la Fig. 2.5. et on retourne à la feuille « Caractéristiques Générales de l'éolienne » :



Fig. 2.5. Message d'avertissement.

Le programme envoie aussi un message, fig. 2.6., si on n'ajoute pas des caractères numériques ou si on ajoute «.» au lieu de «,» :

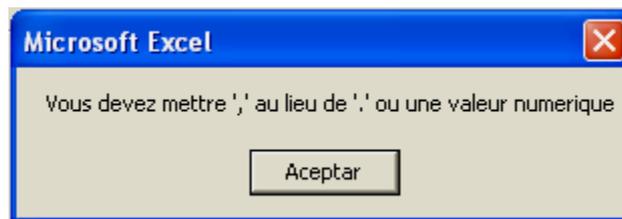


Fig. 2.6. Message d'avertissement.

Une fois que l'on a cliqué sur le bouton « Ajouter Caract. » les boutons « Tableaux » et « Graphiques » (qui étaient désactivés et on ne pouvait pas les cliquer) s'activent.

Si on clique sur « Tableaux » apparaît la feuille « Sélection des Tableaux » (Fig. 2.7.)



Fig. 2.7. « Sélection des Tableaux »

L'utilisateur peut choisir les différentes tables qu'il a besoin de voir. S'il choisit la table « Caract. de l'éolienne », on ouvre une nouvelle feuille qui s'appelle « Choix de la vitesse » (Fig. 2.8.). Dans cette feuille on peut choisir une vitesse du vent pour laquelle on veut savoir toutes les caractéristiques de l'éolienne, c'est-à-dire, la puissance et les efforts

aérodynamiques. On peut voir aussi une table avec les valeurs de puissance, des efforts, des angles (angle de calage, angle du vent relatif et angle d'attaque), des coefficients de portance et traînée, etc. par chaque section de la pale.

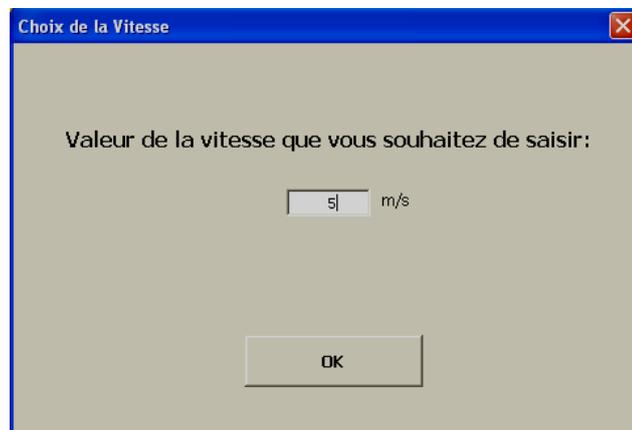


Fig. 2.8 « Choix de la Vitesse »

Dans « Sélection des tableaux » (Fig. 2.7.), si on choisit « Vitesse / Section » s'ouvre une feuille d'Excel sur laquelle on peut voir la répartition de puissance pour chaque section de la pale en fonction de la vitesse du vent. D'autre part, si on choisit « Vitesse / Efforts » on ouvre une table où on observe la répartition des efforts pour chaque vitesse du vent et rapport de fonctionnement.

Dans la partie inférieure « Sélection des tableaux » (Fig. 2.7.), il y a un bouton « Retour » à la feuille principale « Caractéristiques Générales de l'éolienne ». (Fig. 2.4.).

Par contre, si, dans la feuille « Caractéristiques Générales de l'éolienne » (Fig. 2.4.), l'utilisateur clique sur le bouton « Graphiques », il va apparaître une nouvelle feuille avec différents graphiques qu'on peut choisir (Fig. 2.9.). Ces graphiques sont :

- « Puissance / Vitesse » : Puissance totale en fonction de la vitesse du vent.
- « Coef. Puis. / Vitesse » : Même graphique que le précédent.
- « Section / Vitesse » : Répartition de puissances pour chaque section en fonction de la vitesse du vent.
- « Couple / Vitesse » : Couple moteur en fonction de la vitesse du vent.
- « Poussée / Vitesse » : Poussée axiale en fonction de la vitesse du vent

Dans quelque graphique il y a le bouton « Retour » à la feuille principale « Caractéristiques Générales de l'éolienne ».

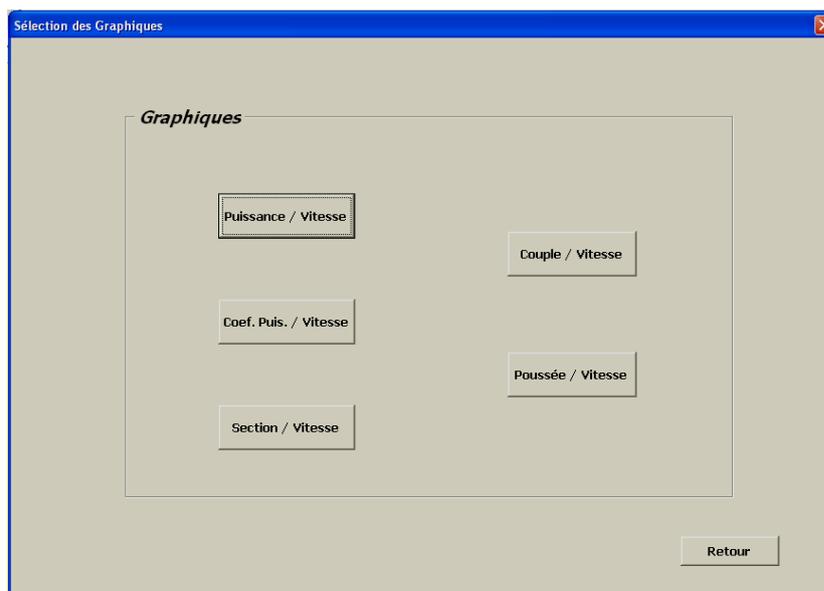


Fig. 2.9. « Sélection des Graphiques »

### 2.5.3.1 Exemple d'utilisation

On va prendre une éolienne tripale rapide, avec les caractéristiques suivantes :

Puissance Nominale	⇒	$P_N = 250 \text{ KW}$
Vitesse de démarrage	⇒	$V = 4 \text{ m/s}$
Vitesse nominale	⇒	$V = 14 \text{ m/s}$
Vitesse d'arrêt	⇒	$V = 25 \text{ m/s}$
Vitesse du vent à l'optimum	⇒	$V = 8 \text{ m/s}$
Densité de l'air	⇒	$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

On peut mettre les données correspondantes dans le programme (Fig. 2). Si on choisit « calage par défaut » et « Effet Stall » et avec ces données d'entrée on a les caractéristiques suivantes de l'éolienne, Tableau 2.4. et la distribution de la longueur de corde et de l'angle de calage du Tableau 2.5. :

Nombre de Pales	3
Densité de l'air [kg/m <sup>3</sup> ]	1,250
Puissance Nominale [W]	250000
Vitesse du Vent optimal [m/s]	8,0
Puissance récupérée à l'optimum [W]	100000
$\lambda_{opt}$	6
Rayon de l'éolienne [m]	15,06
Vitesse de Rotation du Rotor[rad/s]	3,19

Tableau. 2.4. Table des caractéristiques de l'éolienne.

Rayon Relatif	Angle de Calage [°]	Longueur de Corde[m]
0,15	14,29	2,50
0,25	12,70	2,38
0,35	7,82	1,94
0,45	4,50	1,60
0,55	2,22	1,35
0,65	0,58	1,16
0,75	-0,65	1,02
0,85	-1,61	0,91
0,95	-2,37	0,82
0,99	-2,63	0,78

Tableau. 2.5. Les angles de calage et les longueurs de corde pour chaque section de la pale.

En suivant les instructions du programme qu'on a vu dans le dernier chapitre, on peut obtenir les graphiques suivantes des figures 2.10, 2.11, 2.12 et 2.13 :

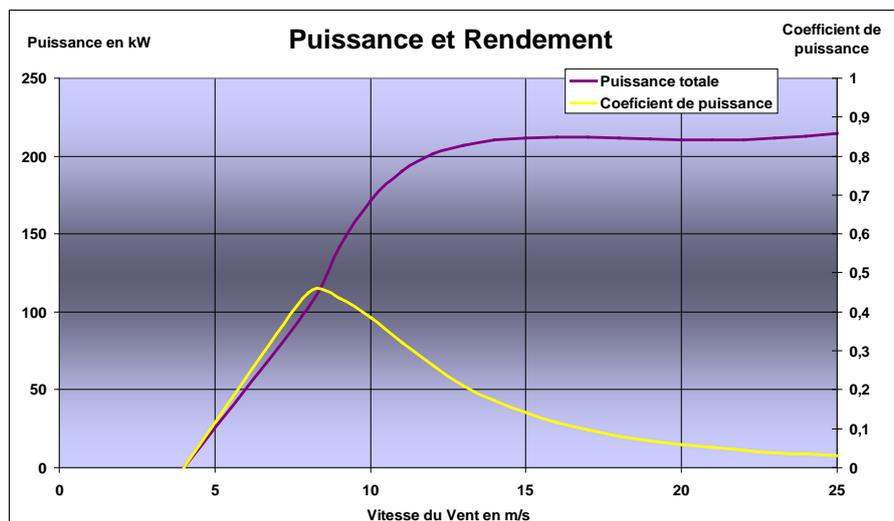


Fig. 2.10. Puissance et coefficient de puissance en fonction du vent.

La Fig. 2.11. montre que le coefficient de puissance est optimal et égal à 0,45 pour une vitesse du vent de 8 m/s, c'est-à-dire, pour la vitesse du vent optimale (comme on voulait). L'éolienne démarre à partir d'environ 4 m/s et elle arrive à la puissance nominale à une vitesse du vent de 14 m/s.

Le couple moteur (Fig. 2.12.) suit une distribution égale, qualitativement, à la puissance, comme il était prévu car la vitesse de rotation du rotor est constante. Le couple maximal est atteint là où la puissance est maximale.

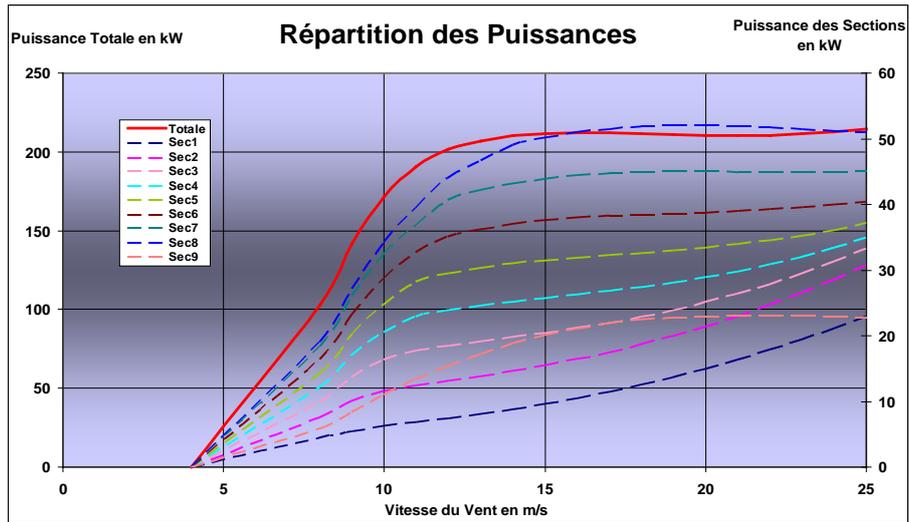


Fig. 2.11. Répartition de puissances pour quelque section de la pale en fonction du vent.

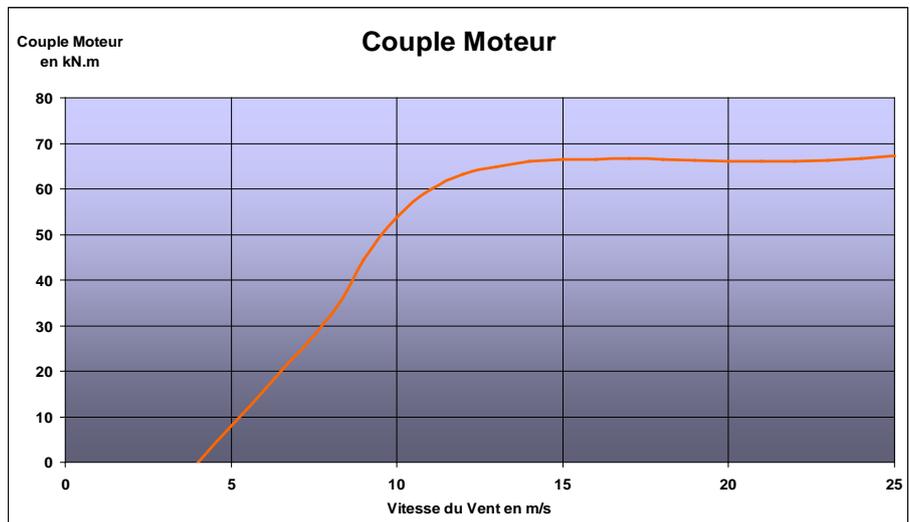


Fig. 2.12. Couple Moteur en fonction du vent.

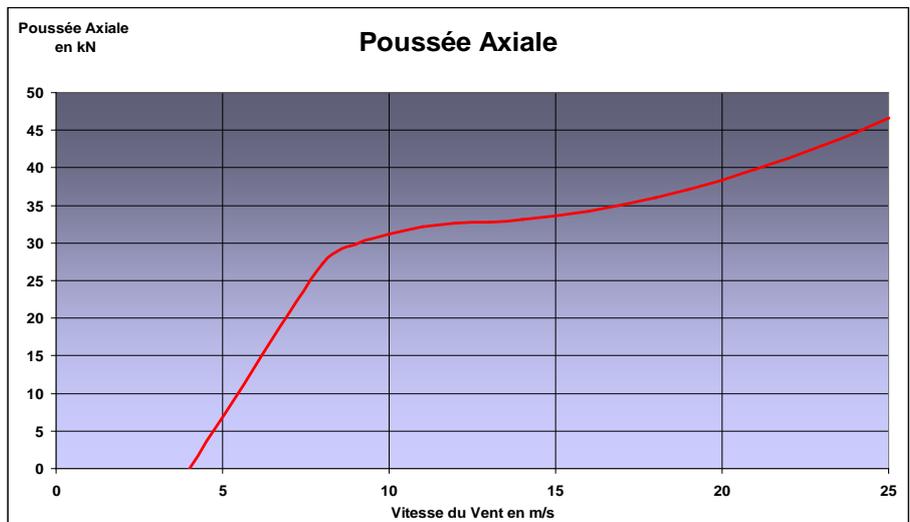


Fig. 2.13. Poussée axiale en fonction du vent.

La poussée axiale est toujours croissante avec la vitesse du vent comme il était prévu car si on augmente la vitesse du vent, l'angle d'incidence augmente et la traînée du profil augmente aussi.

Avec notre programme on peut obtenir aussi les tableaux qu'on a vu dans le chapitre précédent. On peut connaître les caractéristiques de l'éolienne pour une vitesse du vent, par exemple, 10 m/s. En suivant les instructions du programme on arrive aux tableaux suivantes de résultats :

Vitesse du Vent (m/s)	10,00
Nombre de Pales	3
Rayon d'éolienne (m)	15,06
Vitesse du Vent à l'optimum (m/s)	8,00
Vitesse de Rotation du Rotor (rad/s)	3,19
Densité d'air (kg/m <sup>3</sup> )	1,25
Puissance Nominale (W)	250000

Puissances :

Puissance Totale (W)	171298
Puissance du Vent (W)	445392
Puissance de Betz (W)	263936
Coefficient Puissance	0,38

Efforts :

Moment de Flexion (M <sub>xb</sub> ) (N.m)	322701
Poussée Axiale pour chaque pale (F <sub>xb</sub> ) (N)	10415
Couple Poussée pour chaque pale (M <sub>yb</sub> ) (N.m)	106064
Force Motrice (F <sub>yb</sub> ) (N)	6713
Couple Moteur (M <sub>xn</sub> ) (N.m)	53748

Tableau 2.6.. Puissances et efforts agissant sur les pales.

On peut voir aussi les puissances des sections de la pale en fonction de la vitesse du vent si on choisit le bouton « Vitesse / Section ». La puissance totale pour quelque vitesse du vent nous donne :

$\lambda$	12,00	6,00	5,33	4,80	4,36	4,00	3,69	3,43	3,20
V (m/s)	4	8	9	10	11	12	13	14	15
Puissance (W)	0	102571	141593	171237	190307	201792	206858	210342	211627

3,00	2,82	2,67	2,53	2,40	2,29	2,18	2,09	2,00	1,92
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
212102	212298	211554	210866	210410	210291	210589	211367	212672	214543

Tableau 2. 7.. Puissance totale pour plusieurs vitesses du vent.

Finalement, on peut voir le tableau des efforts aérodynamiques en fonction de la vitesse du vent en cliquant sur le bouton « Vitesse / Efforts ». Il faut remarquer que les efforts sont pour une pale.

$\lambda$	V (m/s)	Moment de Flexion [N.m]	Couple Moteur [N.m]	Couple Poussée [N.m]	Poussée Axiale [N]	Force Motrice [N]
12,00	4	0	0	0	0	0
6,00	8	93853	32184	93238	9099	4026
5,33	9	102524	44428	101448	9941	5538
4,80	10	107559	53730	106057	10414	6711
4,36	11	110801	59713	108998	10710	7521
4,00	12	112494	63317	110496	10865	8083
3,69	13	112618	64906	110520	10927	8474
3,43	14	113228	66000	111070	11057	8829
3,20	15	113786	66403	111612	11212	9138
3,00	16	114815	66552	112651	11427	9439
2,82	17	116310	66613	114171	11698	9748
2,67	18	118071	66380	115979	12010	10062
2,53	19	120273	66164	118234	12374	10397
2,40	20	122900	66021	120914	12788	10758
2,29	21	125939	65984	124004	13249	11150
2,18	22	129377	66077	127489	13756	11579
2,09	23	133203	66321	131356	14307	12047
2,00	24	137406	66731	135594	14902	12559
1,92	25	141976	67318	140192	15539	13116

Tableau 2.8. Efforts aérodynamiques pour plusieurs vitesses du vent.

### 2.5.3.2. Comparaison avec NORDEX N-250

Les caractéristiques de cette éolienne sont les suivantes :

Puissance nominale	⇒	$P_N = 250 \text{ KW}$
Vitesse de démarrage	⇒	$V = 3- 4 \text{ m/s}$
Vitesse nominale	⇒	$V = 14 \text{ m/s}$
Vitesse d'arrêt	⇒	$V = 25 \text{ m/s}$
Vitesse du vent à l'optimum	⇒	$V = 8 \text{ m/s}$
Diamètre du rotor	⇒	$D = 29 \text{ m}$
Vitesse de rotation du rotor	⇒	$\Omega = 3,3 \text{ rad/s}$

Comme on le voit, les valeurs du diamètre du rotor et de la vitesse de rotation du rotor de la vraie éolienne et les valeurs obtenues par le programme se rassemblent beaucoup.

On ne connaît pas ni la distribution de la longueur de corde, ni la distribution de l'angle de calage et on sait seulement que les pales ont un profil NACA 63xxx (rappelons qu'on a un profil NACA 63215). Ces données ne sont pas fournies par les constructeurs d'éoliennes, dans ce cas Nordex.

On ne connaît pas non plus les efforts de l'éolienne. Par contre, on a les données de la puissance fournie par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent et du coefficient de puissance. Ce sont :

Vitesse du vent (m/s)	0	3	4	5	6	7	8	9
Puissance (W)	0	2000	12000	24000	35000	58000	95000	128000
Coef. Puissance	0,00	0,08	0,18	0,25	0,33	0,39	0,43	0,41

Vitesse du vent (m/s)	10	11	12	13	14	15	16	17
Puissance (W)	161000	190000	213000	225000	234000	245000	254000	261000
Coef. Puissance	0,37	0,33	0,28	0,24	0,20	0,17	0,14	0,12

Vitesse du vent (m/s)	18	19	20	21	22	23	24	25
Puissance (W)	265000	271000	267000	263000	259000	253000	248000	245000
Coef. Puissance	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04

Tableau 2.9. Puissance et coefficient de puissance de l'éolienne Nordex N-250.

La courbe de puissance de la NORDEX N-250 est la suivante :

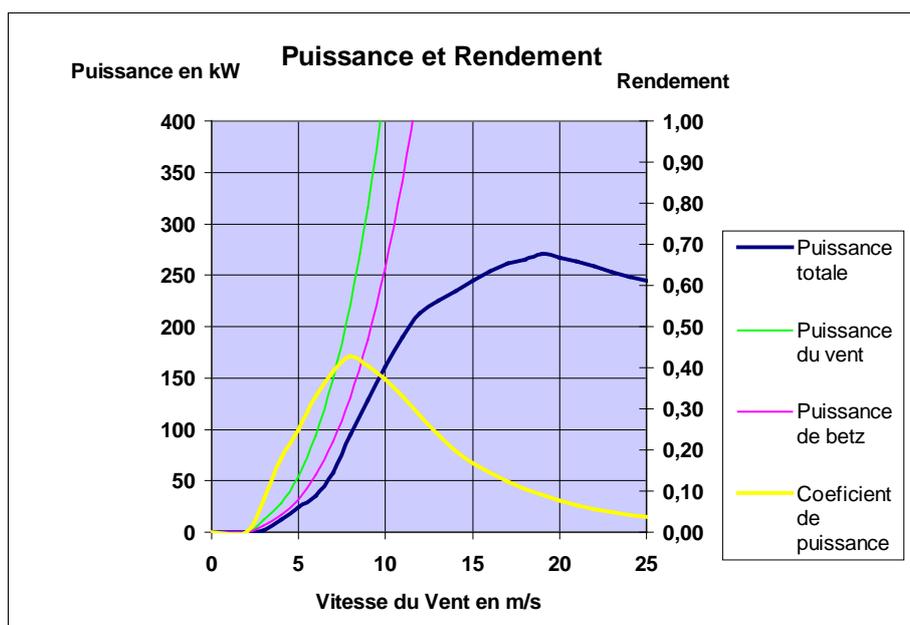


Fig. 2. 14. Courbe de puissance, NORDEX N-250.

Si on regarde la courbe de puissance de la NORDEX N-250, fig. 2.14, et la courbe qu'on a obtenue avec notre programme, fig. 2. 10, on voit que la courbe du coefficient de puissance suit le même comportement. Il arrive au maximum à 8 m/s de 0,43 dans la vraie courbe et de 0,45 si on le calcul avec notre programme. La forme de la courbe est la même et les valeurs sont très proches.

Les courbes de puissance sont égales qualitativement. L'éolienne démarre a 3-4 m/s dans les deux cas et arrive à la puissance maximale à 14 m/s. La principale différence est le valeur de la puissance nominale, c'est-à-dire, de la puissance maximale que l'éolienne peut fournir.

On voit dans la fig. 2.10. qu'on n'arrive pas à la puissance nominale 250 KW où on devrait arriver. Selon le programme, l'éolienne pourrait fournir seulement environ 210 KW. Cette différence est due à des mauvaises dimensions et caractéristiques du rotor du programme.

On ne connaît pas la vraie distribution de longueur de corde ni de l'angle de calage. Rappelons que, comme on a vu dans le chapitre du calcul de rotor optimal, les distributions de corde et de calage qu'on a pris étaient des bonnes distributions pour la vitesse du vent optimale. Mais au-delà de ce point on ne sait pas s'ils sont les meilleures conditions.

D'autre part, on ne connaît pas non plus le vrai profil de la pale de la NORDEX N-250, on sait que c'est un profil NACA 63xxx, mais on ne sait pas si c'est un NACA 63215 comme le notre. Puis, on doit rappeler que, normalement, le profil n'est pas le même tout au long de la pale. Il change pour avoir une épaisseur plus grande près du moyeu. On a pris le même profil pour toute la pale parce que on n'a pas les données suffisantes pour savoir où le profil change. Aussi il faut remarquer qu'on ne connaît pas les coefficients de portances et de traînée pour tous les angles d'incidence. Comme on a dit, il est très difficile d'obtenir ces coefficients au-delà du point de décrochage et les fabricants ne facilitent pas ces données. On a fait une approximation (Viterna-Corrigan) pour obtenir les polaires à partir de 15°, mais, comme on a vu, c'est seulement une approximation pour des angles de calage égaux à zéro et pour des angles différents il change un peu.

On veut donc, que le programme donne des bonnes valeurs si on l'utilise avec des bonnes pales. Mais il est très difficile de trouver les données de ces pales car les fabricants d'éoliennes ne les révèlent pas. On voit l'importance d'avoir un bon dessin de pales (corde, calage et profil) pour obtenir des résultats optimaux de puissance.

Le programme pourrait être utilisé comme une première approximation pour concevoir des pales et voir les résultats qu'ils pourraient donner et après les améliorer en travaillant en soufflerie.

## 4. REFERENCES

1. GREENPEACE, "*Wind Force 12: A Blueprint To Achieve 12 % Of The World's Electricity From Wind Power By 2020*". Janvier 2004, EWEA.
2. CHABOT, B., "*Bilan et perspective du développement de l'énergie éolienne en France*". janvier 2004, ADEME.
3. LE GOURIERES, D., *ENERGIE EOLIENNE. Theorie, conception et calcul pratique des instalations*, ed. Eyrolles. 1982: Pergamon Press.
4. ZAHARAN, M., *Etude des performances d'une éolienne en presence d'un gradient de vent*. 1982, Paul Sabatier: Toulouse.
5. GLAUERT, H., *Windmills and Fans. Aerodynamic theory*, ed. W.F. Durand. 1963, New York: Dover Pub. Inc.
6. EGGLESTON, D., *WIND TURBINE ENGINEERING DESIGN*. Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1987, New York. 47.
7. GOETHALS, R., *ENERGIE EOLIENNE*, U. Poitiers, Editor. 1983: Poitiers.
8. GLAUERT, H., "*Airplane Propellers*", in *Aerodynamic Theory*, W.F. Durand, Editor. 1935, Springer Verlag: Berlin.
9. STEWART, H.J., *Dual optimum aerodynamic design for a conventional windmill*. AIAA Journal 14, Nov. 1976. **11**.
10. SPERA, D.A., *Wind Turbine Technology*, ed. P. D. 1994, New York: ASME PRESS.
11. MILLER, R.H., *Aerodynamics of horizontal axis wind turbines*, ed. A.a.S.R. Lab. 1978.
12. PARASCHIVOIU, I., *Aérodynamique subsonique*, ed. l'EPM. 2000, Montréal: Ecole polytechnique de Montréal.
13. VITERNA, L.A. and R.D. CORRIGAN, *Fixed pitch rotor performance of large horizontal axis wind turbines*, in *DOE/NASA*. July 1981: Cleveland, Ohio.
14. [www.windpower.org](http://www.windpower.org).

## ANNEXE 3

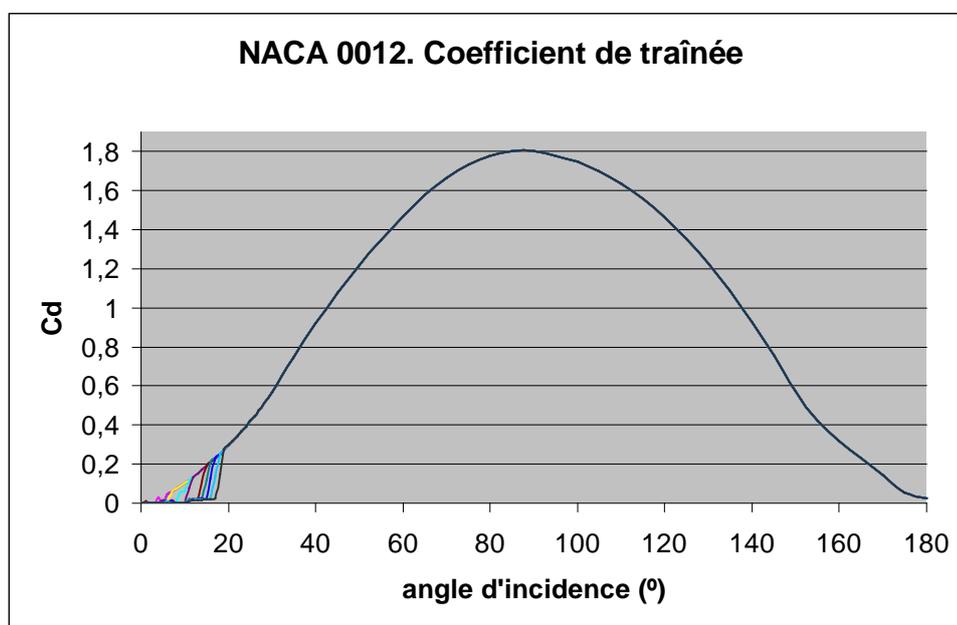
### PROFILS DE PALE SYMETRIQUES

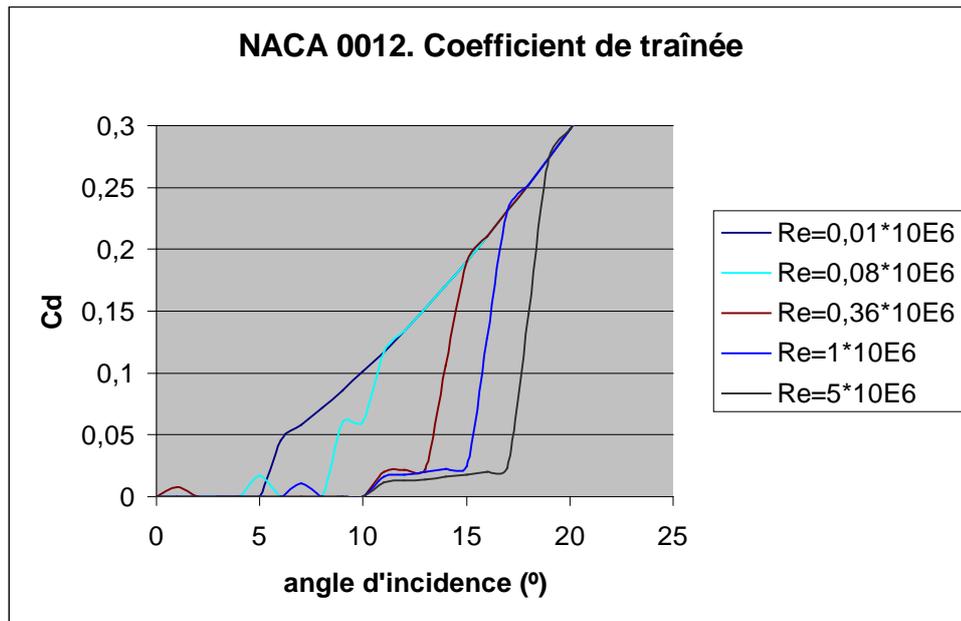
#### NACA 0012 :

- Coefficient de traînée, «  $C_d$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour différents nombres de Reynolds, «  $Re(\times 10^6)$  ».

$\alpha/\square Re$	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,36	0,7	1	2	5
0,00	0,0337	0,0245	0,0175	0,0133	0,0103	0,0079	0,0067	0,0065	0,0064	0,0064
1,00	0,0338	0,0247	0,0177	0,0134	0,0104	0,0080	0,0068	0,0066	0,0064	0,0064
2,00	0,0343	0,0251	0,0181	0,0138	0,0108	0,0084	0,007	0,0068	0,0066	0,0066
3,00	0,0351	0,0259	0,0189	0,0145	0,0114	0,0089	0,0075	0,0071	0,0069	0,0068
4,00	0,0359	0,0270	0,0199	0,0155	0,0124	0,0098	0,0083	0,0078	0,0073	0,0072
5,00	0,0351	0,0282	0,0218	0,0170	0,0140	0,0113	0,0097	0,0091	0,0081	0,0076
6,00	0,0460	0,0460	0,0232	0,0189	0,0152	0,0125	0,0108	0,0101	0,0090	0,0081
7,00	0,0580	0,0580	0,0240	0,0204	0,0170	0,0135	0,0118	0,0110	0,0097	0,0086
8,00	0,0720	0,0720	0,0240	0,0222	0,0185	0,0153	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
9,00	0,0860	0,0860	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
10,00	0,1010	0,1010	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
11,00	0,1170	0,1170	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
12,00	0,1340	0,1340	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
13,00	0,1520	0,1520	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
14,00	0,1710	0,1710	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
15,00	0,1900	0,1900	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
16,00	0,2100	0,2100	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
17,00	0,2310	0,2310	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
18,00	0,2520	0,2520	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
19,00	0,2740	0,2740	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
20,00	0,2970	0,2970	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
21,00	0,3200	0,3200	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
22,00	0,3440	0,3440	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
23,00	0,3690	0,3690	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
24,00	0,3940	0,3940	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
25,00	0,4200	0,4200	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
26,00	0,4460	0,4460	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
27,00	0,4730	0,4730	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
30,00	0,5700	0,5700	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
35,00	0,7450	0,7450	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
40,00	0,9200	0,9200	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
45,00	1,0750	1,0750	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
50,00	1,2150	1,2150	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
55,00	1,3450	1,3450	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
60,00	1,4700	1,4700	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
65,00	1,5750	1,5750	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
70,00	1,6650	1,6650	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
75,00	1,7350	1,7350	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
80,00	1,7800	1,7800	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
85,00	1,8000	1,8000	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
90,00	1,8000	1,8000	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092
95,00	1,7800	1,7800	0,0240	0,0203	0,0167	0,0144	0,0128	0,0119	0,0105	0,0092

<b>100,00</b>	1,7500	1,7500	1,7500	1,7500	1,7500	1,7500	1,7500	1,7500	1,7500	1,7500
<b>105,00</b>	1,7000	1,7000	1,7000	1,7000	1,7000	1,7000	1,7000	1,7000	1,7000	1,7000
<b>110,00</b>	1,6350	1,6350	1,6350	1,6350	1,6350	1,6350	1,6350	1,6350	1,6350	1,6350
<b>115,00</b>	1,5550	1,5550	1,5550	1,5550	1,5550	1,5550	1,5550	1,5550	1,5550	1,5550
<b>120,00</b>	1,4650	1,4650	1,4650	1,4650	1,4650	1,4650	1,4650	1,4650	1,4650	1,4650
<b>125,00</b>	1,3500	1,3500	1,3500	1,3500	1,3500	1,3500	1,3500	1,3500	1,3500	1,3500
<b>130,00</b>	1,2250	1,2250	1,2250	1,2250	1,2250	1,2250	1,2250	1,2250	1,2250	1,2250
<b>135,00</b>	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850
<b>140,00</b>	0,9250	0,9250	0,9250	0,9250	0,9250	0,9250	0,9250	0,9250	0,9250	0,9250
<b>145,00</b>	0,7550	0,7550	0,7550	0,7550	0,7550	0,7550	0,7550	0,7550	0,7550	0,7550
<b>150,00</b>	0,5750	0,5750	0,5750	0,5750	0,5750	0,5750	0,5750	0,5750	0,5750	0,5750
<b>155,00</b>	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200	0,4200
<b>160,00</b>	0,3200	0,3200	0,3200	0,3200	0,3200	0,3200	0,3200	0,3200	0,3200	0,3200
<b>165,00</b>	0,2300	0,2300	0,2300	0,2300	0,2300	0,2300	0,2300	0,2300	0,2300	0,2300
<b>170,00</b>	0,1400	0,1400	0,1400	0,1400	0,1400	0,1400	0,1400	0,1400	0,1400	0,1400
<b>175,00</b>	0,0550	0,0550	0,0550	0,0550	0,0550	0,0550	0,0550	0,0550	0,0550	0,0550
<b>180,00</b>	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250

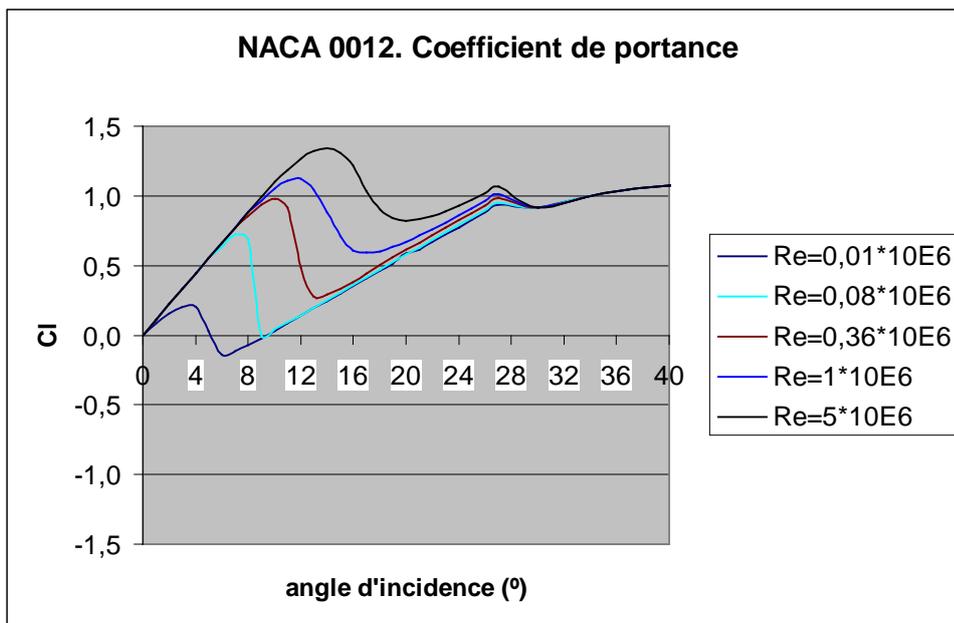
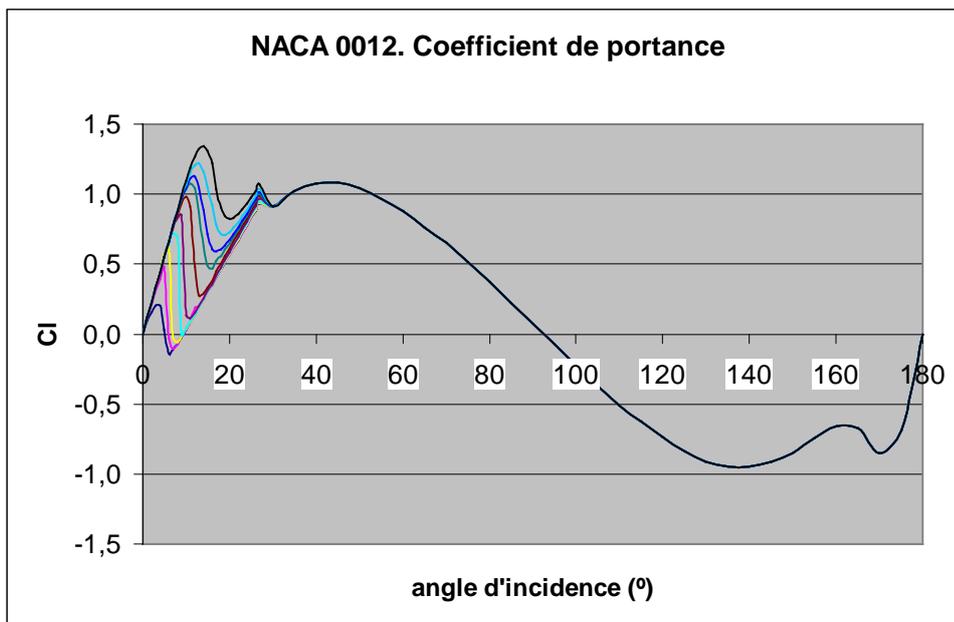




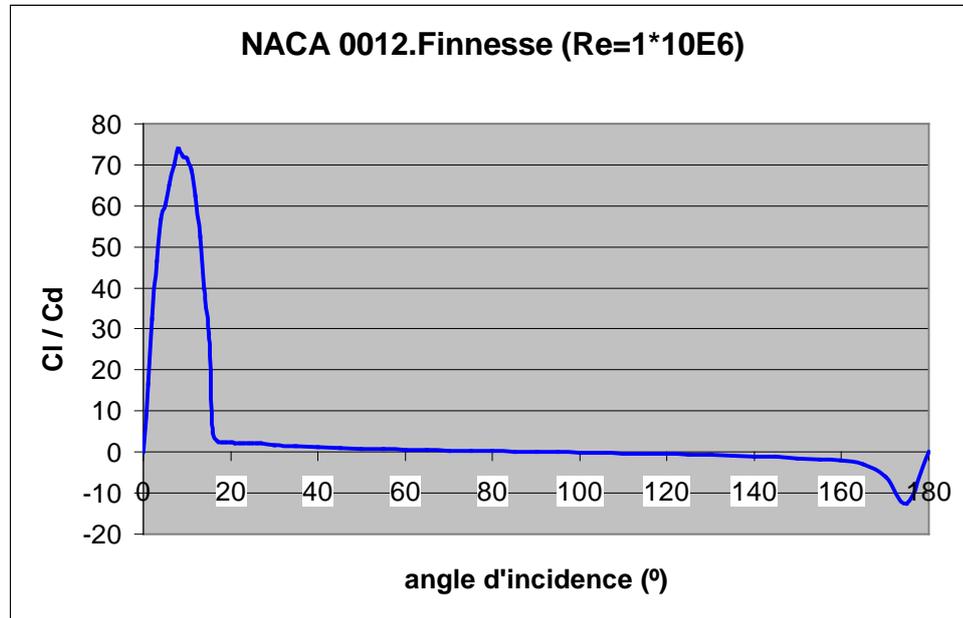
- Coefficient de portance, «  $C_l$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour différents nombres de Reynolds, «  $Re(\times 10^6)$  ».

$\alpha \square / Re$	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,36	0,7	1	2	5
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,0	0,0830	0,1057	0,1100	0,1100	0,1100	0,1100	0,1100	0,1100	0,1100	0,1100
2,0	0,1534	0,2072	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200
3,0	0,2009	0,3032	0,3376	0,3300	0,3300	0,3300	0,3300	0,3300	0,3300	0,3300
4,0	0,2003	0,3929	0,4464	0,4400	0,4400	0,4400	0,4400	0,4400	0,4400	0,4400
5,0	0,0328	0,4781	0,5726	0,5500	0,5500	0,5500	0,5500	0,5500	0,5500	0,5500
6,0	-0,1413	-0,0298	0,6115	0,6384	0,6600	0,6600	0,6600	0,6600	0,6600	0,6600
7,0	-0,1142	-0,1089	-0,0212	0,7227	0,7460	0,7700	0,7700	0,7700	0,7700	0,7700
8,0	-0,0703	-0,0699	-0,0615	0,6930	0,8274	0,8542	0,8800	0,8800	0,8800	0,8800
9,0	-0,0215	-0,0198	-0,0160	-0,0010	0,8527	0,9352	0,9598	0,9661	0,9900	0,9900
10,0	0,0311	0,0320	0,0344	0,0413	0,1325	0,9811	1,0343	1,0512	1,0727	1,1000
11,0	0,0848	0,0856	0,0869	0,0911	0,1095	0,9132	1,0749	1,1097	1,1539	1,1842
12,0	0,1387	0,1894	0,1406	0,1430	0,1533	0,4832	1,0390	1,1212	1,2072	1,2673
13,0	0,1928	0,1934	0,1945	0,1966	0,2030	0,2759	0,8737	1,0487	1,2169	1,3242
14,0	0,2468	0,2474	0,2484	0,2504	0,2546	0,2893	0,6284	0,8846	1,1614	1,3423
15,0	0,3008	0,3014	0,3024	0,3043	0,3082	0,3306	0,4907	0,7108	1,0478	1,3093
16,0	0,3548	0,3554	0,3563	0,3582	0,3620	0,3792	0,4696	0,6060	0,9221	1,2195
17,0	0,4079	0,4089	0,4107	0,4139	0,4200	0,4455	0,5195	0,5906	0,7826	1,0365
18,0	0,4606	0,4620	0,4644	0,4689	0,4768	0,5047	0,5584	0,6030	0,7163	0,9054
19,0	0,5121	0,5147	0,5178	0,5232	0,5322	0,5591	0,6032	0,6334	0,7091	0,8412
20,0	0,5838	0,5663	0,5708	0,5770	0,5870	0,6120	0,6474	0,6716	0,7269	0,8233
21,0	0,6161	0,6184	0,6232	0,6305	0,6414	0,6643	0,6949	0,7162	0,7595	0,8327
22,0	0,6687	0,6709	0,6755	0,6839	0,6956	0,7179	0,7446	0,7613	0,7981	0,8563
23,0	0,7216	0,7238	0,7283	0,7373	0,7497	0,7715	0,7948	0,8097	0,8429	0,8903
24,0	0,7744	0,7765	0,7809	0,7902	0,8034	0,8246	0,8462	0,8589	0,8882	0,9295
25,0	0,8276	0,8297	0,8340	0,8432	0,8572	0,8780	0,8984	0,9093	0,9352	0,9718
26,0	0,8810	0,8831	0,8873	0,8963	0,9109	0,9313	0,9506	0,9618	0,9842	1,0193
27,0	0,9345	0,9365	0,9407	0,9496	0,9646	0,9846	1,0029	1,0144	1,0355	1,0680
30,0	0,9150	0,9150	0,9150	0,9150	0,9150	0,9150	0,9150	0,9150	0,9150	0,9150
35,0	1,0200	1,0200	1,0200	1,0200	1,0200	1,0200	1,0200	1,0200	1,0200	1,0200
40,0	1,0750	1,0750	1,0750	1,0750	1,0750	1,0750	1,0750	1,0750	1,0750	1,0750
45,0	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850	1,0850
50,0	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400
55,0	0,9650	0,9650	0,9650	0,9650	0,9650	0,9650	0,9650	0,9650	0,9650	0,9650
60,0	0,8750	0,8750	0,8750	0,8750	0,8750	0,8750	0,8750	0,8750	0,8750	0,8750
65,0	0,7650	0,7650	0,7650	0,7650	0,7650	0,7650	0,7650	0,7650	0,7650	0,7650
70,0	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500	0,6500
75,0	0,5150	0,5150	0,5150	0,5150	0,5150	0,5150	0,5150	0,5150	0,5150	0,5150
80,0	0,3700	0,3700	0,3700	0,3700	0,3700	0,3700	0,3700	0,3700	0,3700	0,3700
85,0	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200	0,2200
90,0	0,0700	0,0700	0,0700	0,0700	0,0700	0,0700	0,0700	0,0700	0,0700	0,0700
95,0	-0,0700	-0,0700	-0,0700	-0,0700	-0,0700	-0,0700	-0,0700	-0,0700	-0,0700	-0,0700
100,0	-0,2200	-0,2200	-0,2200	-0,2200	-0,2200	-0,2200	-0,2200	-0,2200	-0,2200	-0,2200
105,0	-0,3700	-0,3700	-0,3700	-0,3700	-0,3700	-0,3700	-0,3700	-0,3700	-0,3700	-0,3700
110,0	-0,5100	-0,5100	-0,5100	-0,5100	-0,5100	-0,5100	-0,5100	-0,5100	-0,5100	-0,5100
115,0	-0,6250	-0,6250	-0,6250	-0,6250	-0,6250	-0,6250	-0,6250	-0,6250	-0,6250	-0,6250
120,0	-0,7350	-0,7350	-0,7350	-0,7350	-0,7350	-0,7350	-0,7350	-0,7350	-0,7350	-0,7350
125,0	-0,8400	-0,8400	-0,8400	-0,8400	-0,8400	-0,8400	-0,8400	-0,8400	-0,8400	-0,8400
130,0	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100
135,0	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450
140,0	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450	-0,9450
145,0	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100	-0,9100

<b>150,0</b>	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500
<b>155,0</b>	-0,7400	-0,7400	-0,7400	-0,7400	-0,7400	-0,7400	-0,7400	-0,7400	-0,7400	-0,7400
<b>160,0</b>	-0,6600	-0,6600	-0,6600	-0,6600	-0,6600	-0,6600	-0,6600	-0,6600	-0,6600	-0,6600
<b>165,0</b>	-0,6750	-0,6750	-0,6750	-0,6750	-0,6750	-0,6750	-0,6750	-0,6750	-0,6750	-0,6750
<b>170,0</b>	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500
<b>175,0</b>	-0,6900	-0,6900	-0,6900	-0,6900	-0,6900	-0,6900	-0,6900	-0,6900	-0,6900	-0,6900
<b>180,0</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000



- Finesse (ratio portance / traînée), en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour le nombre de Reynolds  $Re = 1 \times 10^6$

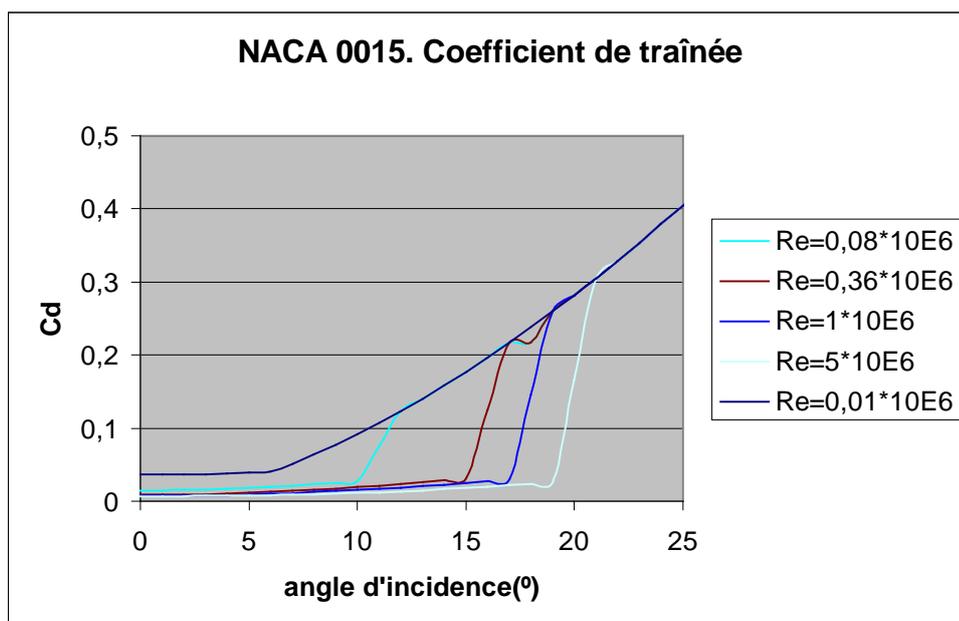
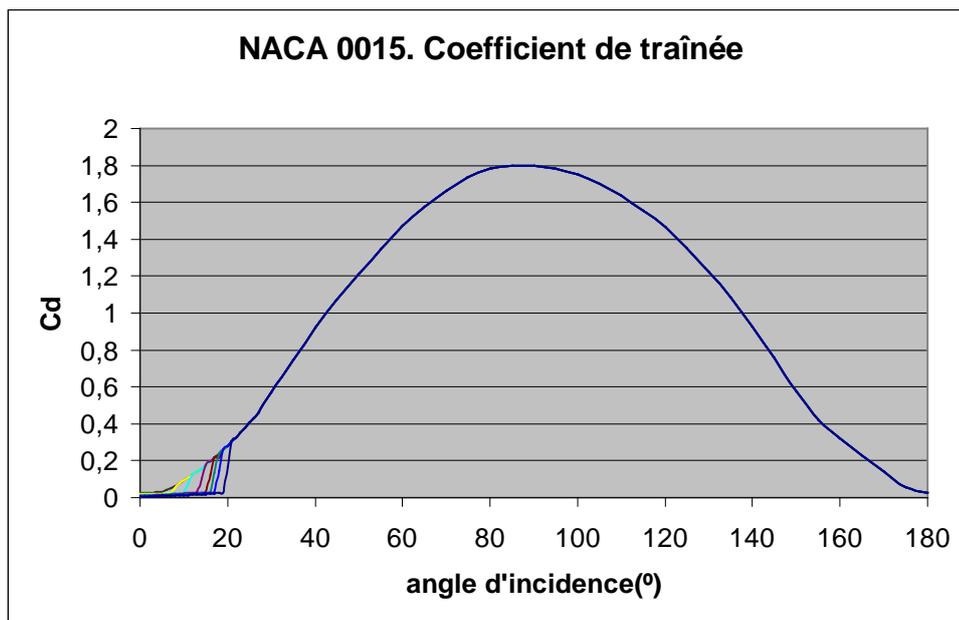


## NACA 0015 :

- Coefficient de traînée, «  $C_d$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour différents nombres de Reynolds, «  $Re(\times 10^6)$  ».

$\alpha/Re$	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,36	0,7	1	2	5
0,0	0,036	0,027	0,020	0,015	0,012	0,009	0,008	0,007	0,007	0,007
1,0	0,036	0,027	0,020	0,015	0,012	0,009	0,008	0,008	0,007	0,007
2,0	0,037	0,027	0,020	0,015	0,012	0,009	0,008	0,008	0,007	0,007
3,0	0,037	0,028	0,021	0,016	0,012	0,010	0,008	0,008	0,008	0,007
4,0	0,038	0,029	0,022	0,017	0,013	0,011	0,009	0,008	0,008	0,008
5,0	0,039	0,030	0,023	0,018	0,014	0,011	0,010	0,009	0,008	0,008
6,0	0,040	0,041	0,025	0,020	0,016	0,013	0,011	0,010	0,009	0,008
7,0	0,051	0,051	0,027	0,021	0,018	0,014	0,012	0,011	0,010	0,009
8,0	0,064	0,064	0,052	0,023	0,019	0,016	0,014	0,013	0,011	0,010
9,0	0,077	0,077	0,077	0,026	0,021	0,017	0,015	0,014	0,012	0,010
10,0	0,091	0,091	0,091	0,028	0,023	0,019	0,016	0,015	0,013	0,011
11,0	0,107	0,107	0,107	0,076	0,026	0,021	0,018	0,017	0,015	0,012
12,0	0,123	0,123	0,123	0,123	0,028	0,023	0,020	0,019	0,016	0,014
13,0	0,140	0,140	0,140	0,140	0,030	0,026	0,022	0,021	0,018	0,015
14,0	0,158	0,158	0,158	0,158	0,104	0,028	0,024	0,023	0,020	0,016
15,0	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,031	0,027	0,025	0,022	0,018
16,0	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,124	0,030	0,028	0,024	0,020
17,0	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,134	0,030	0,026	0,022
18,0	0,238	0,238	0,217	0,217	0,217	0,217	0,238	0,145	0,029	0,024
19,0	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,155	0,027
20,0	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,166
21,0	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305
22,0	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329
23,0	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354
24,0	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379	0,379
25,0	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405
26,0	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432	0,432
27,0	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460
30,0	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570
35,0	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745
40,0	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920
45,0	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
50,0	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215
55,0	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345
60,0	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470
65,0	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575
70,0	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665
75,0	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735
80,0	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780
85,0	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800
90,0	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800
95,0	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780
100,0	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750
105,0	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700
110,0	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635
115,0	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555
120,0	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465
125,0	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350
130,0	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225

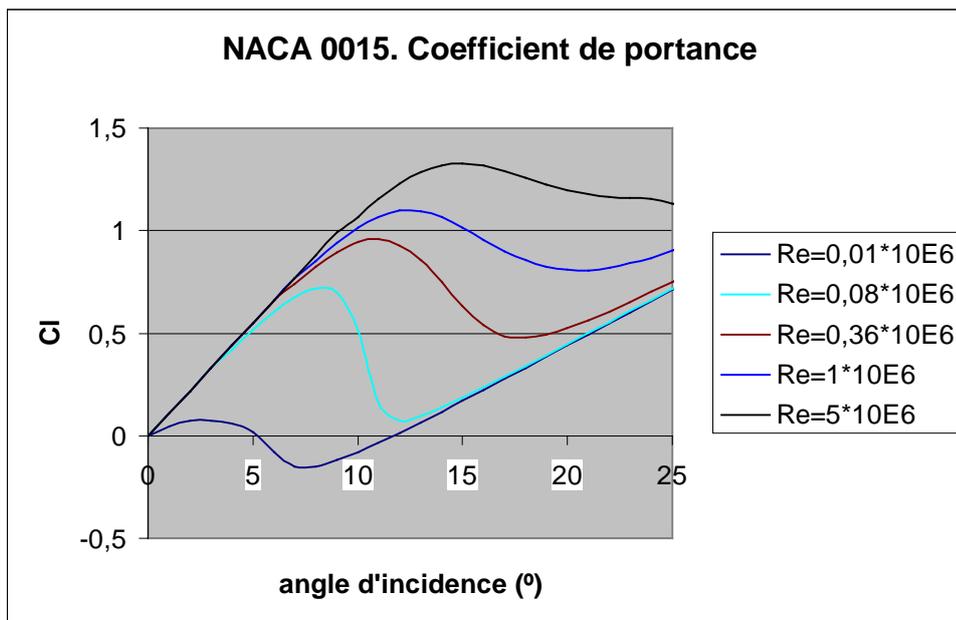
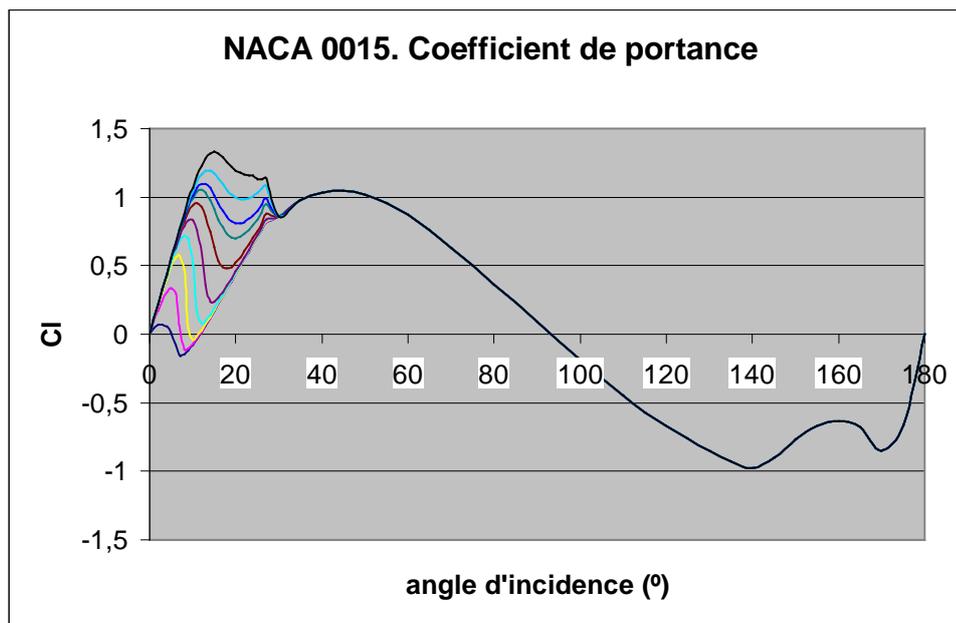
135,0	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085
140,0	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925
145,0	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755
150,0	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575
155,0	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420
160,0	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320
165,0	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230
170,0	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140
175,0	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055
180,0	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025



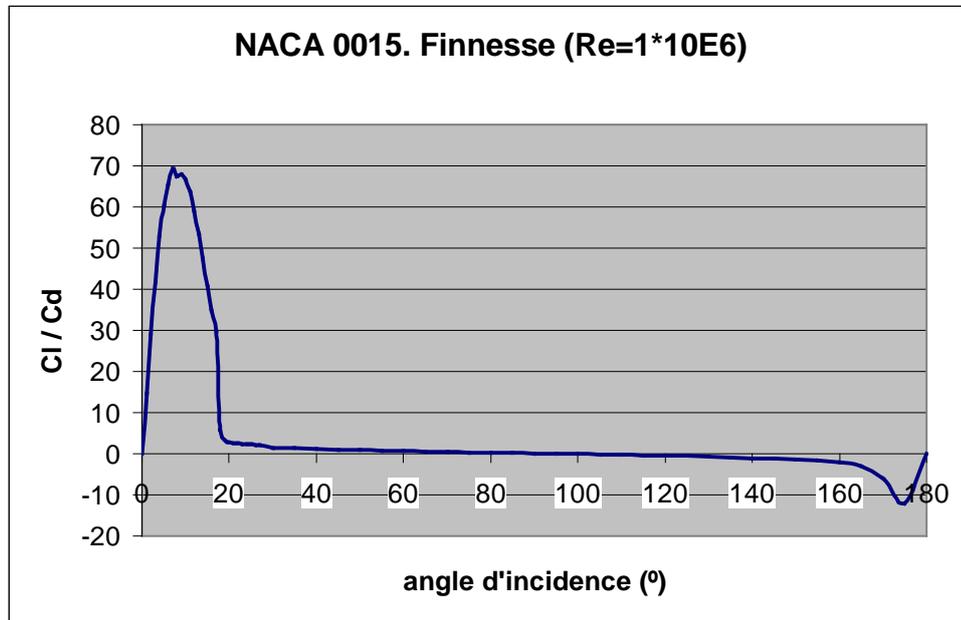
- Coefficient de portance, «  $C_l$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour différents nombres de Reynolds, «  $Re(\times 10^6)$  ».

$\alpha/Re$	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,36	0,7	1	2	5
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,043	0,089	0,105	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110
2,0	0,072	0,174	0,210	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220
3,0	0,073	0,245	0,308	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330
4,0	0,058	0,304	0,402	0,419	0,440	0,440	0,440	0,440	0,440	0,440
5,0	0,016	0,336	0,487	0,518	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550
6,0	-0,078	0,300	0,555	0,605	0,630	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660
7,0	-0,152	0,057	0,573	0,676	0,715	0,739	0,748	0,770	0,770	0,770
8,0	-0,148	-0,110	0,466	0,719	0,785	0,824	0,844	0,850	0,880	0,880
9,0	-0,119	-0,105	0,043	0,697	0,831	0,895	0,926	0,939	0,957	0,990
10,0	-0,079	-0,073	-0,041	0,512	0,832	0,944	0,994	1,014	1,043	1,069
11,0	-0,035	-0,030	-0,014	0,164	0,762	0,957	1,036	1,069	1,114	1,155
12,0	0,014	0,017	0,026	0,075	0,594	0,929	1,051	1,097	1,167	1,229
13,0	0,065	0,068	0,074	0,097	0,355	0,856	1,030	1,096	1,195	1,285
14,0	0,117	0,119	0,124	0,138	0,237	0,748	0,980	1,066	1,196	1,319
15,0	0,171	0,172	0,176	0,186	0,238	0,635	0,912	1,015	1,174	1,330
16,0	0,224	0,226	0,228	0,236	0,267	0,538	0,840	0,957	1,136	1,319
17,0	0,278	0,279	0,282	0,287	0,310	0,485	0,780	0,900	1,092	1,292
18,0	0,332	0,333	0,335	0,339	0,357	0,478	0,731	0,857	1,051	1,258
19,0	0,386	0,387	0,389	0,393	0,407	0,491	0,704	0,823	1,017	1,224
20,0	0,440	0,441	0,443	0,446	0,458	0,525	0,699	0,809	0,995	1,197
21,0	0,494	0,495	0,497	0,500	0,509	0,562	0,710	0,806	0,984	1,177
22,0	0,548	0,549	0,551	0,554	0,561	0,605	0,730	0,819	0,983	1,165
23,0	0,602	0,603	0,605	0,608	0,615	0,653	0,759	0,841	0,991	1,161
24,0	0,656	0,657	0,659	0,662	0,669	0,702	0,796	0,867	1,008	1,156
25,0	0,710	0,711	0,713	0,716	0,722	0,751	0,835	0,902	1,032	1,132
26,0	0,764	0,765	0,767	0,770	0,777	0,806	0,884	0,941	1,059	1,127
27,0	0,817	0,819	0,822	0,828	0,838	0,879	0,947	0,991	1,081	1,140
30,0	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855
35,0	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980
40,0	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035
45,0	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050
50,0	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020
55,0	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955
60,0	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
65,0	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760
70,0	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630
75,0	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
80,0	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365
85,0	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230
90,0	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090
95,0	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050
100,0	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185
105,0	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320
110,0	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450
115,0	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575
120,0	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670
125,0	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760
130,0	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850
135,0	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930
140,0	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980
145,0	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900

<b>150,0</b>	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770
<b>155,0</b>	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670
<b>160,0</b>	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635
<b>165,0</b>	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680
<b>170,0</b>	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850
<b>175,0</b>	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660
<b>180,0</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000



- Finesse (ratio portance / traînée), en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour le nombre de Reynolds  $Re = 1 \times 10^6$

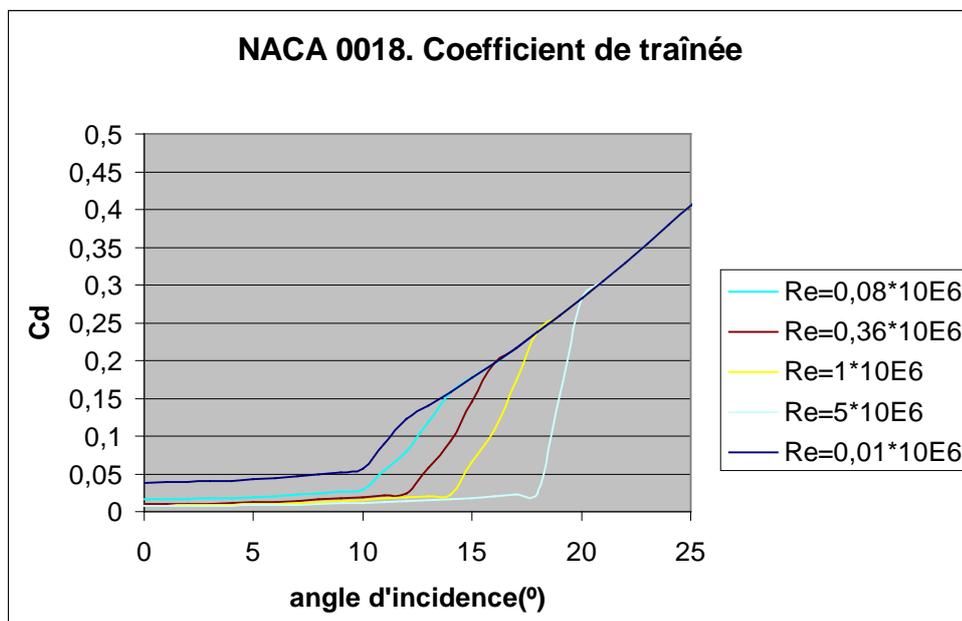
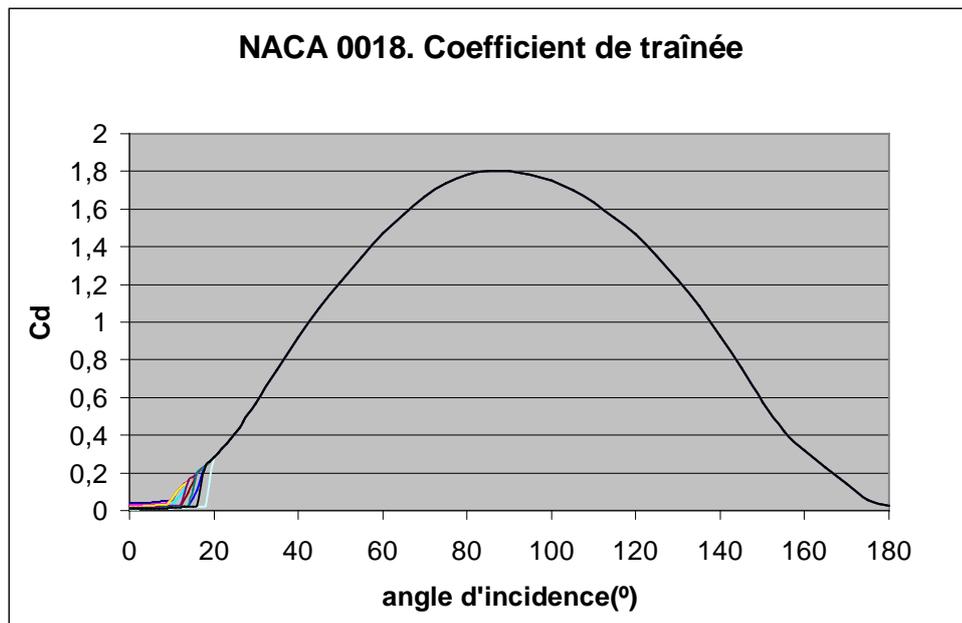


## NACA 0018 :

- Coefficient de traînée, «  $C_d$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour différents nombres de Reynolds, «  $Re(\times 10^6)$  ».

$\alpha/Re$	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,36	0,7	1	2	5
0,0	0,039	0,029	0,021	0,016	0,013	0,010	0,009	0,008	0,008	0,007
1,0	0,039	0,029	0,022	0,016	0,013	0,010	0,009	0,008	0,008	0,007
2,0	0,039	0,029	0,022	0,017	0,013	0,010	0,009	0,008	0,008	0,008
3,0	0,040	0,030	0,023	0,017	0,014	0,011	0,009	0,009	0,008	0,008
4,0	0,041	0,031	0,024	0,018	0,014	0,011	0,010	0,009	0,008	0,008
5,0	0,043	0,032	0,025	0,019	0,015	0,012	0,010	0,010	0,009	0,008
6,0	0,044	0,034	0,026	0,021	0,017	0,013	0,011	0,010	0,009	0,009
7,0	0,046	0,036	0,028	0,022	0,018	0,015	0,012	0,012	0,010	0,009
8,0	0,049	0,038	0,030	0,024	0,020	0,016	0,014	0,013	0,011	0,010
9,0	0,053	0,040	0,033	0,026	0,022	0,018	0,015	0,014	0,012	0,011
10,0	0,057	0,063	0,062	0,029	0,024	0,019	0,017	0,015	0,013	0,012
11,0	0,090	0,093	0,092	0,054	0,026	0,022	0,018	0,017	0,015	0,013
12,0	0,123	0,123	0,123	0,080	0,029	0,024	0,020	0,019	0,016	0,014
13,0	0,141	0,141	0,140	0,119	0,093	0,059	0,022	0,021	0,018	0,015
14,0	0,158	0,158	0,158	0,158	0,158	0,094	0,025	0,023	0,020	0,017
15,0	0,177	0,177	0,177	0,177	0,177	0,145	0,110	0,065	0,022	0,018
16,0	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,108	0,024	0,020
17,0	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,173	0,131	0,022
18,0	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,024
19,0	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,153
20,0	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282
21,0	0,306	0,306	0,306	0,306	0,306	0,306	0,306	0,306	0,306	0,306
22,0	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329	0,329
23,0	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354	0,354
24,0	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380
25,0	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405	0,405
26,0	0,438	0,438	0,438	0,438	0,438	0,438	0,438	0,438	0,438	0,438
27,0	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471	0,471
30,0	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570
35,0	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745	0,745
40,0	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920	0,920
45,0	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
50,0	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215	1,215
55,0	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345	1,345
60,0	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470	1,470
65,0	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575
70,0	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665
75,0	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735	1,735
80,0	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780
85,0	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800
90,0	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800
95,0	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780	1,780
100,0	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750	1,750
105,0	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700
110,0	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635	1,635
115,0	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555	1,555
120,0	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465	1,465
125,0	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350	1,350
130,0	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225

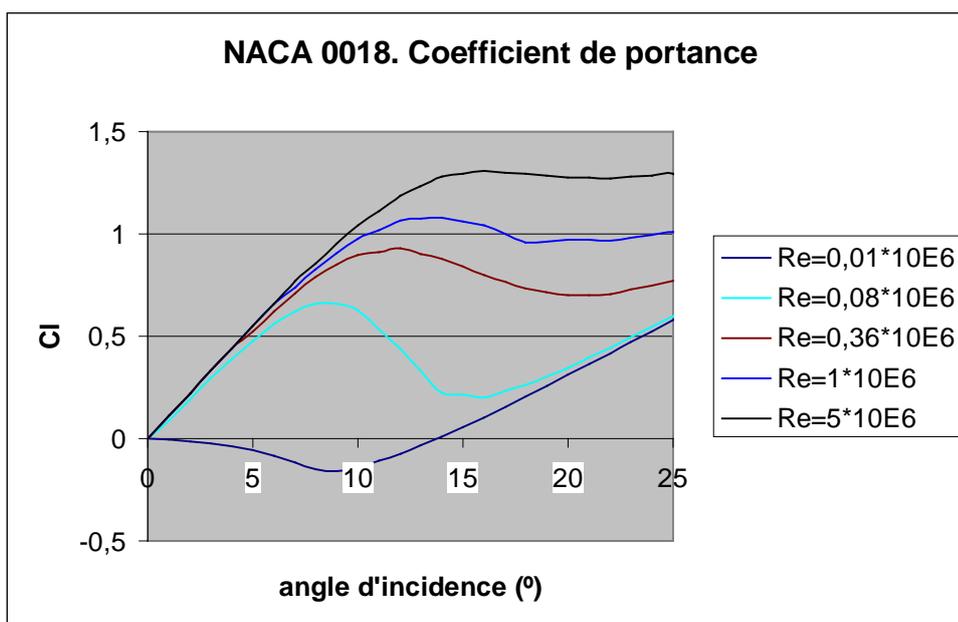
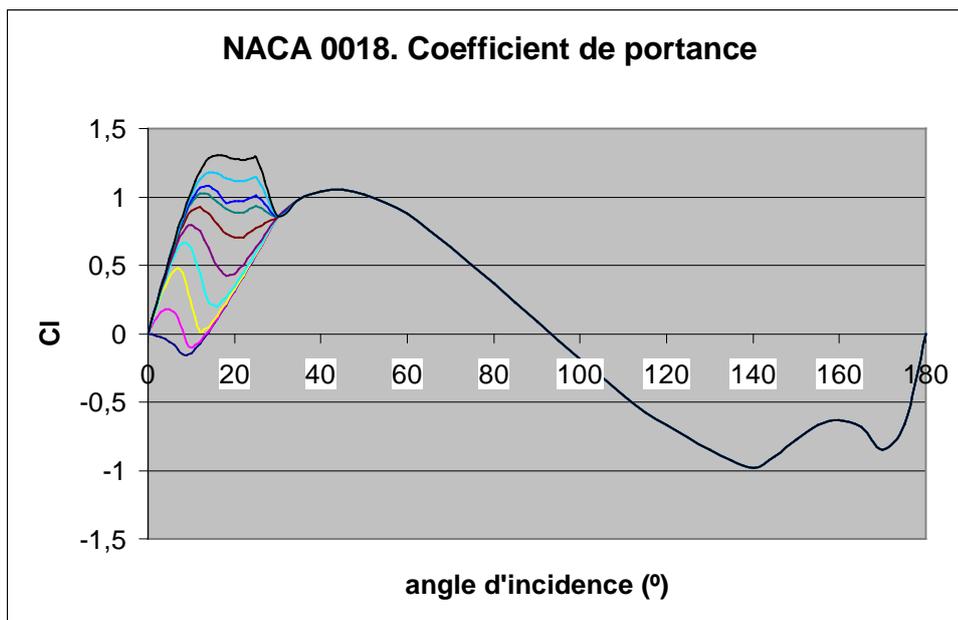
<b>135,0</b>	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085
<b>140,0</b>	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925
<b>145,0</b>	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755	0,755
<b>150,0</b>	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575	0,575
<b>155,0</b>	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420
<b>160,0</b>	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320	0,320
<b>165,0</b>	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230
<b>170,0</b>	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140
<b>175,0</b>	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055
<b>180,0</b>	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025



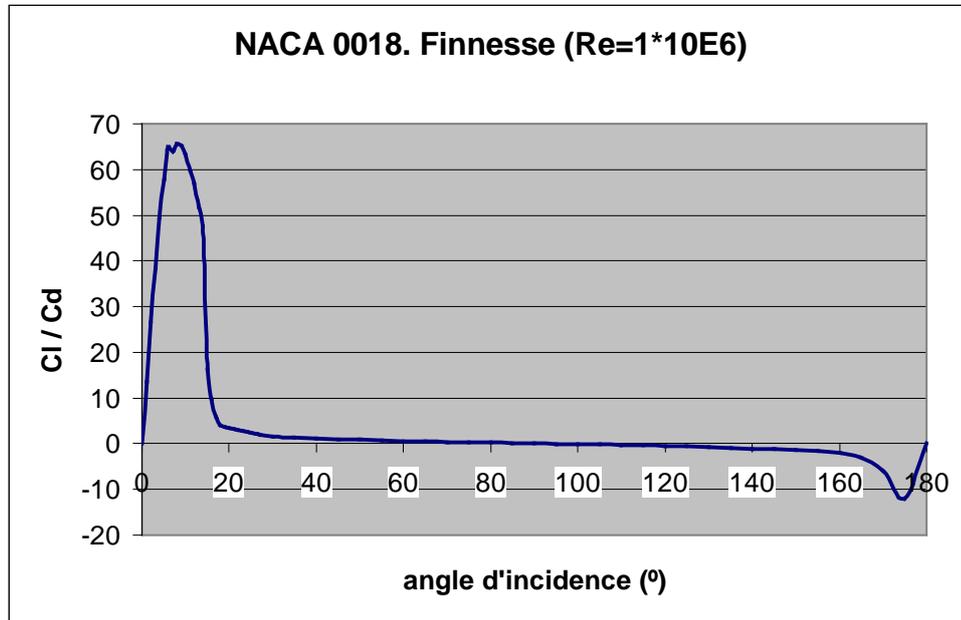
- Coefficient de portance, «  $C_l$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour différents nombres de Reynolds, «  $Re(\times 10^6)$  ».

$\alpha/Re$	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,36	0,7	1	2	5
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	-0,005	0,061	0,094	0,089	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110
2,0	-0,015	0,114	0,183	0,194	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220
3,0	-0,023	0,155	0,269	0,292	0,309	0,330	0,330	0,330	0,330	0,330
4,0	-0,037	0,179	0,350	0,388	0,411	0,440	0,440	0,440	0,440	0,440
5,0	-0,058	0,179	0,412	0,475	0,507	0,524	0,550	0,550	0,550	0,550
6,0	-0,084	0,158	0,457	0,562	0,596	0,623	0,633	0,660	0,660	0,660
7,0	-0,118	0,116	0,476	0,622	0,672	0,710	0,729	0,736	0,745	0,770
8,0	-0,150	0,021	0,443	0,659	0,737	0,788	0,816	0,826	0,844	0,854
9,0	-0,158	-0,068	0,354	0,661	0,778	0,853	0,890	0,907	0,931	0,953
10,0	-0,142	-0,100	0,211	0,625	0,795	0,898	0,954	0,975	1,011	1,040
11,0	-0,110	-0,081	0,112	0,533	0,772	0,913	0,989	1,021	1,070	1,114
12,0	-0,077	-0,060	0,014	0,441	0,749	0,928	1,025	1,066	1,130	1,188
13,0	-0,034	-0,020	0,031	0,333	0,686	0,901	1,021	1,073	1,156	1,235
14,0	0,009	0,017	0,049	0,226	0,624	0,880	1,018	1,079	1,181	1,281
15,0	0,057	0,064	0,089	0,214	0,557	0,841	0,991	1,060	1,175	1,294
16,0	0,105	0,111	0,129	0,203	0,490	0,801	0,965	1,040	1,170	1,307
17,0	0,156	0,162	0,175	0,232	0,455	0,766	0,940	0,998	1,154	1,301
18,0	0,207	0,212	0,223	0,260	0,420	0,732	0,915	0,956	1,138	1,296
19,0	0,259	0,264	0,273	0,304	0,429	0,716	0,901	0,963	1,128	1,286
20,0	0,311	0,315	0,324	0,347	0,438	0,700	0,888	0,971	1,117	1,277
21,0	0,364	0,368	0,375	0,395	0,470	0,702	0,887	0,970	1,115	1,274
22,0	0,417	0,420	0,427	0,443	0,503	0,705	0,887	0,970	1,113	1,271
23,0	0,471	0,473	0,479	0,494	0,546	0,728	0,902	0,983	1,124	1,278
24,0	0,524	0,527	0,532	0,545	0,589	0,750	0,917	0,997	1,135	1,286
25,0	0,578	0,580	0,584	0,596	0,632	0,772	0,933	1,011	1,147	1,293
26,0	0,633	0,635	0,638	0,648	0,677	0,789	0,917	0,980	1,088	1,205
27,0	0,689	0,690	0,692	0,700	0,721	0,805	0,902	0,948	1,030	1,118
30,0	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855	0,855
35,0	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980
40,0	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035
45,0	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050	1,050
50,0	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020
55,0	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955
60,0	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
65,0	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760
70,0	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630	0,630
75,0	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
80,0	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365	0,365
85,0	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230	0,230
90,0	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090
95,0	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050	-0,050
100,0	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185	-0,185
105,0	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320	-0,320
110,0	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450	-0,450
115,0	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575	-0,575
120,0	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670
125,0	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760	-0,760
130,0	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850

135,0	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930	-0,930
140,0	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980	-0,980
145,0	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900
150,0	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770	-0,770
155,0	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670	-0,670
160,0	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635	-0,635
165,0	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680	-0,680
170,0	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850	-0,850
175,0	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660	-0,660
180,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000



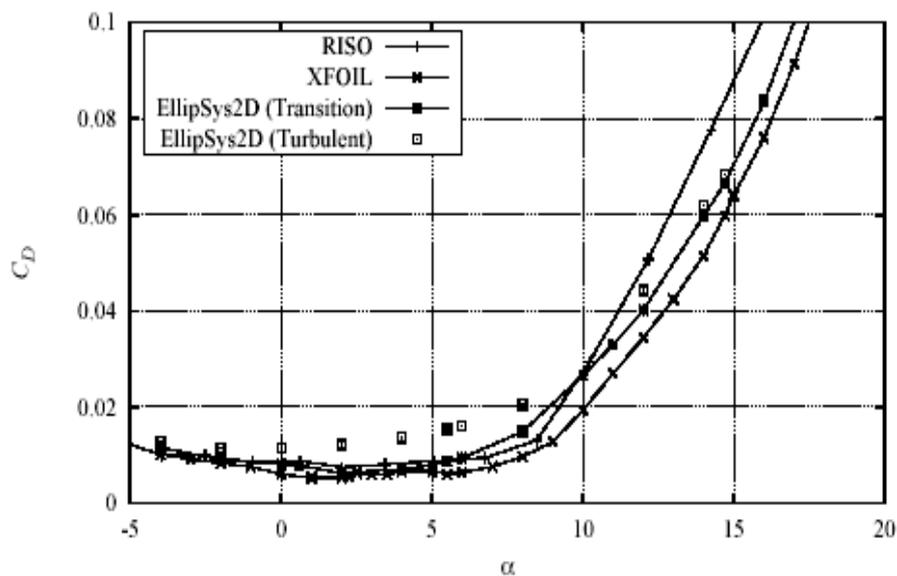
- Finesse (ratio portance / traînée), en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour le nombre de Reynolds  $Re = 1 \times 10^6$



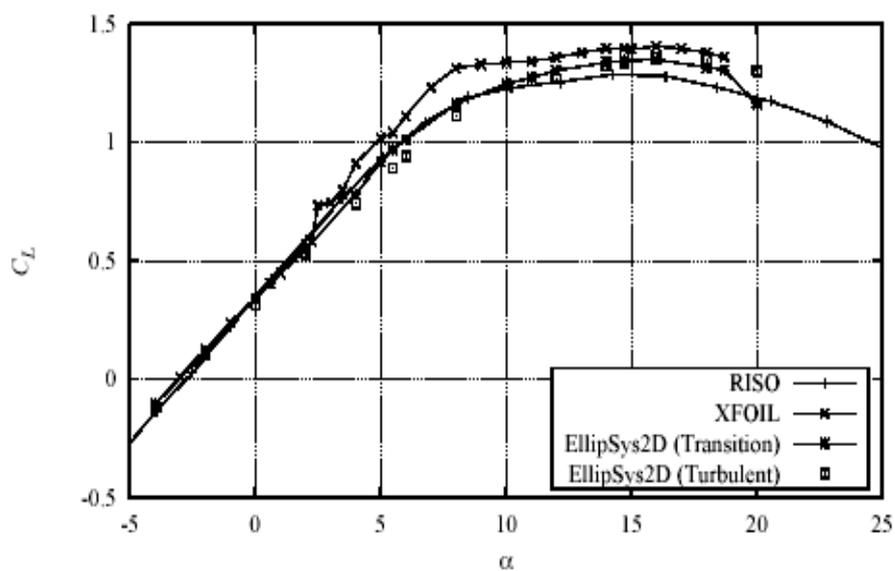
## PROFILS DE PALE NON SYMETRIQUES

### NACA 63215 :

- Coefficient de traînée, «  $C_d$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour le nombre de Reynolds  $Re = 1,6 \times 10^6$



- Coefficient de portance, «  $C_l$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », pour le nombre de Reynolds  $Re = 1,6 \times 10^6$

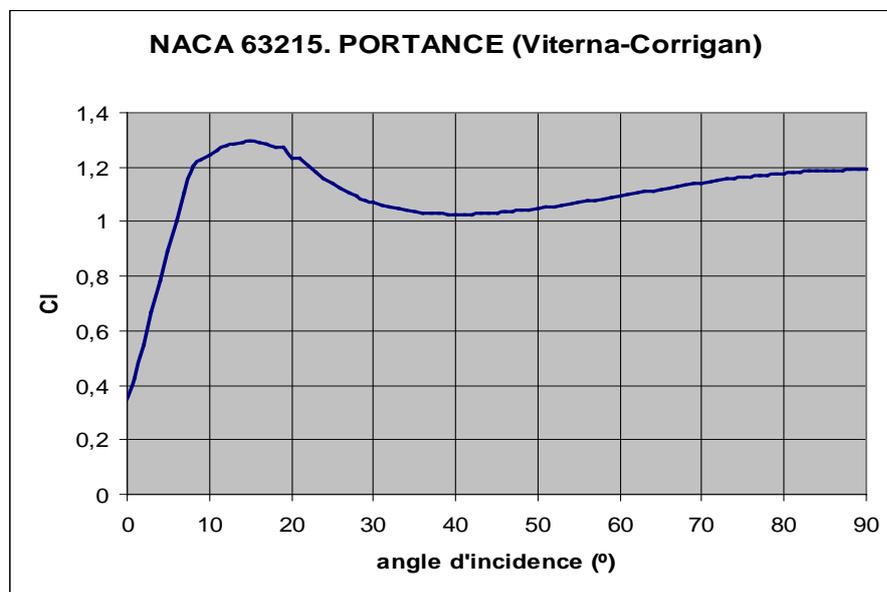


- Coefficient de traînée, «  $C_d$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », avec la correction Viterna-Corrigan :

$$C_{d_{\max}} = 1,11 + 0,018 \cdot AR$$

$$C_d = B_1 \cdot \sin^2 \alpha + B_2 \cdot \cos \alpha \quad \Rightarrow \quad B_1 = C_{d_{\max}}$$

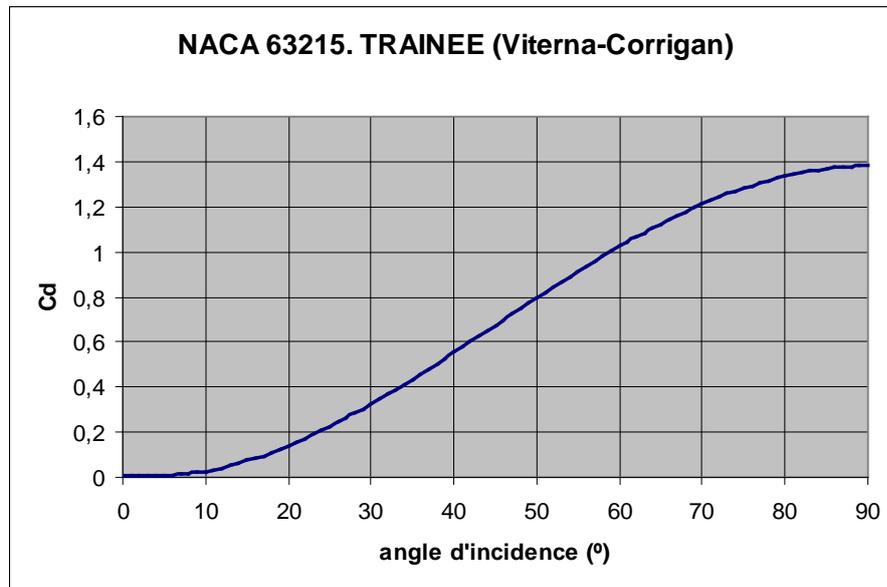
$$B_2 = \left( \frac{1}{\cos \alpha_s} \right) \cdot (C_{ds} - C_{d_{\max}} \cdot \sin^2 \alpha_s)$$



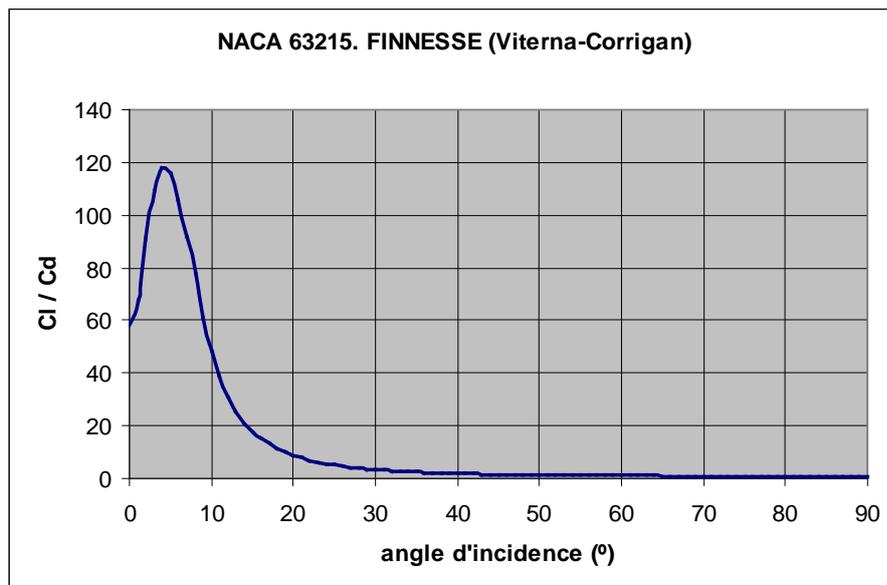
- Coefficient de portance, «  $C_l$  », en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », avec la correction Viterna-Corrigan :

$$C_l = A_1 \cdot \sin^2 \alpha + A_2 \cdot \left( \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) \Rightarrow A_1 = \frac{B_1}{2}$$

$$B_2 = (C_{ls} - C_{d_{\max}} \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \alpha_s) \cdot \left( \frac{\sin \alpha_s}{\cos^2 \alpha_s} \right)$$



- Finesse (ratio portance / traînée), en fonction de l'angle d'incidence, «  $\alpha$  », avec la correction Viterna-Corrigan :



## ANNEXE 4

### PROGRAMMATION EN VBA

- FEUIL « DÉMARRER » :

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Load fmCaraGenerales  
fmCaraGenerales.Show  
End
```

- FEUILS « GRAPHIQUE 1, 2, 3, 4 » ET « TABLES 1, 2, 3 » :

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Sheets("Démarrer").Select  
ActiveSheet.Activate  
Load fmCaraGenerales  
fmCaraGenerales.Show  
End Sub
```

- FEUIL « CARACTERISTIQUE GENERALES DE L'ÉOLIENNE » :

```
Private Sub chkcalagedefault_Click()  
If chkcalagedefault.Value = True Then  
    chkchoixcalage.Enabled = False  
    fr1.Enabled = False  
Else  
    chkchoixcalage.Enabled = True  
    fr1.Enabled = False  
End If  
End Sub
```

```
Private Sub chkCallage_Click()  
If chkCallage.Value = True Then  
    chkEffetStall.Enabled = False  
Else
```

```
        chkEffetStall.Enabled = True
    End If
End Sub
```

**Private Sub chkchoixcalage\_Click()**

```
    If chkchoixcalage.Value = True Then
        chkcalagedefault.Enabled = False
        fr1.Enabled = True
    Else
        chkcalagedefault.Enabled = True
        fr1.Enabled = False
    End If
End Sub
```

**Private Sub chkEffetStall\_Click()**

```
    If chkEffetStall.Value = True Then
        chkCallage.Enabled = False
    Else
        chkCallage.Enabled = True
    End If
End Sub
```

**Private Sub cmdAjouterCara\_Click()**

```
'verifier si on a rempli les données

    If (txtPales.Text = "" Or txtVitesseVent.Text = "" Or txtDensite.Text = "" Or
        txtPuissanceNom.Text = "" Or (chkEffetStall.Value = False And
        chkCallage.Value = False) Or (chkcalagedefault.Value = False And
        chkchoixcalage.Value = False)) Then
        MsgBox "Vous devez remplir toutes les données",
            vbOKOnly
    Else
        On Error GoTo Trat_error
    'inserer les données dans le feuil

    Call
        EntreeDonnees(txtPales.Value,txtVitesseVent.Value,
            txtDensite.Value, txtPuissanceNom.Value)
```

```

cmdtables.Enabled = True
cmdgraphiques.Enabled = True
If chkcalagedefault.Value = True Then
    Sheets("Feuil0").Range("K15:K24").Copy
    Sheets("Feuil0").Range("G3").PasteSpecial.
        Paste:=xlValues
    Sheets("Feuil").Select
Else
    If (Txt1.Text = "" Or Txt2.Text = "" Or Txt3.Text = ""
    Or Txt4.Text = "" Or Txt5.Text = "" Or Txt6.Text = ""
    Or Txt7.Text = "" Or Txt8.Text = "" Or Txt9.Text = ""
    Or Txt10.Text = "") Then

        MsgBox "Vous devez remplir toutes les
            données", vbOKOnly

    Else
        Call entreecalage(Txt1.Value, Txt2.Value,
            Txt3.Value, Txt4.Value, Txt5.Value, Txt6.Value,
            Txt7.Value, Txt8.Value, Txt9.Value,
            Txt10.Value)
        End If
    End If
End If
    Sheets("Feuil1").Range("D16").Value = txtVitesseVent.Text
Exit Sub
Trat_error:
    Select Case Err.Number
        Case 13: MsgBox "Vous devez mettre ',' au lieu de '.'
            ou une valeur numerique"

    End Select
End Sub

```

```

Public Sub EntreeDonnees(Pales As Integer, VitesseVent As Single,
    Densite As Single, PuissanceNom As Single)
    Sheets("Feuil0").Range("D2").Value = Pales
    Sheets("Feuil0").Range("D3").Value = Densite
    Sheets("Feuil0").Range("D4").Value = PuissanceNom
    Sheets("Feuil0").Range("D5").Value = VitesseVent
End Sub

```

**Public Sub entreecalage**(r1 As Single, r2 As Single, r3 As Single, r4 As Single, r5 As Single, r6 As Single, r7 As Single, r8 As Single, r9 As Single, r10 As Single)

```
Sheets("Feuil0").Range("G3").Value = r1
Sheets("Feuil0").Range("G4").Value = r2
Sheets("Feuil0").Range("G5").Value = r3
Sheets("Feuil0").Range("G6").Value = r4
Sheets("Feuil0").Range("G7").Value = r5
Sheets("Feuil0").Range("G8").Value = r6
Sheets("Feuil0").Range("G9").Value = r7
Sheets("Feuil0").Range("G10").Value = r8
Sheets("Feuil0").Range("G11").Value = r9
Sheets("Feuil0").Range("G12").Value = r10
End Sub
```

**Private Sub cmdgraphiques\_Click()**

```
Load fmGraphiques
fmGraphiques.Show
End Sub
```

**Private Sub cmdQuitter\_Click()**

```
fmCaraGenerales.Hide
Sheets("Démarrer").Select
End Sub
```

**Private Sub cmdtables\_Click()**

```
Load fmTables
fmTables.Show
End Sub
```

- FEUIL « GRAPHIQUES » :

**Private Sub cmdPuissVit\_Click()**

```
fmGraphiques.Hide
fmCaraGenerales.Hide
Sheets("Feuil1").Select
Call MacroTabGra
Sheets("Graphique1").Select
Range("A1").Select
End Sub
```

**Private Sub cmdGraphCpVit\_Click()**

```
    fmGraphiques.Hide
    fmCaraGenerales.Hide
    Sheets("Feuil1").Select
    Call MacroTabGra
    Sheets("Graphique1").Select
    Range("A1").Select
End Sub
```

**Private Sub cmdGraphSecVit\_Click()**

```
    fmGraphiques.Hide
    fmCaraGenerales.Hide
    Sheets("Feuil1").Select
    Call MacroTabGra
    Sheets("Graphique2").Select
    Range("A1").Select
    End Sub
```

**Private Sub cmdPagPrece\_Click()**

```
    Me.Hide
End Sub
```

**Private Sub cmdCouple\_Click()**

```
    fmGraphiques.Hide
    fmCaraGenerales.Hide
    Sheets("Feuil1").Select
    Call MacroTabGra
    Sheets("Graphique3").Select
    Range("A1").Select
End Sub
```

**Private Sub cmdPoussee\_Click()**

```
    fmGraphiques.Hide
    fmCaraGenerales.Hide
    Sheets("Feuil1").Select
    Call MacroTabGra
    Sheets("Graphique4").Select
    Range("A1").Select
    End Sub
```

- FEUIL « TABLES » :

**Private Sub cmdPagPrece\_Click()**

```
Me.Hide  
End Sub
```

**Private Sub cmdTable1\_Click()**

```
fmTables.Hide  
fmCaraGenerales.Hide  
Sheets("Feuil1").Select  
Load fmVitesse  
fmVitesse.Show  
Sheets("Table1").Select  
ActiveSheet.Activate  
End Sub
```

**Private Sub cmdTable2\_Click()**

```
fmTables.Hide  
fmCaraGenerales.Hide  
Sheets("Feuil1").Select  
Call MacroTabGra  
Sheets("Table2").Select  
ActiveSheet.Activate  
End Sub
```

**Private Sub cmdTable3\_Click()**

```
fmTables.Hide  
fmCaraGenerales.Hide  
Sheets("Feuil1").Select  
Call MacroTabGra  
Sheets("Table3").Select  
ActiveSheet.Activate  
End Sub
```

- FEUIL « CHOIX DE LA VITESSE » :

**Private Sub cmdOKVitesse\_Click()**

```
On Error GoTo Trat_error:  
If txtChoixVit.Value = "" Then
```

```

    MsgBox "Vous devez remplir la donnée", vbOKOnly
Else
    If txtChoixVit.Value < 8 Then
        MsgBox "la vitesse doit être V >= 8", vbOKOnly
    Else
        If txtChoixVit.Value > 25 Then
            MsgBox "la vitesse doit être V <= 25", vbOKOnly
        Else
            Call CreerVitesse(txtChoixVit.Value)
            Call iteration
            Me.Hide
        End if
    End If
Exit Sub
Trat_error:
    Select Case Err.Number
        Case 13: MsgBox "Vous devez mettre ',' au lieu de '.'
                        ou une valeur numerique"
    End Select
End Sub

```

```

Public Sub CreerVitesse(ChoixVit As Single)
    Sheets("Feuil1").Range("D16").Value = ChoixVit
End Sub

```

- FEUIL « FEUIL1 ». Feuil du calcul :

### **Sub iteration()**

```

' iteration Macro
' Macro enregistrée le 01/05/2004 par Javier Galindo
' Touche de raccourci du clavier: Ctrl+j

```

```

Dim i As Integer
i = 0

```

```

While (i < 30 And Range("J13").Value <> 0)
    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
```

### **Sub MacroTabGra()**

```
' MacroTabGra Macro
' Macro enregistrée le 12/02/2004 par javier galindo
' Macro pour calculer les tables et les graphiques

Dim i As Integer
Dim Fila As Integer
Fila = 39
Sheets("Feuil1").Select

For i = 1 To 18
    Cells(Fila, 3).Select
    Selection.Copy
    Range("D16").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues

    Call iteration

    Range("N20:N29").Select
    Selection.Copy
    Range("D35").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues, Transpose:=True
    Range("N33").Select
    Selection.Copy
    Range("N35").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues
    Range("D12").Select
    Range("O35").Select
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues
    Range("J13").Select
```

```
Selection.Copy
Range("P35").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues
Range("N34").Select
Selection.Copy
Range("Q35").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues
Range("P5").Select
Selection.Copy
Range("R35").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues
Range("P29").Select
Selection.Copy
Range("S35").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues
Range("Q29").Select
Selection.Copy
Range("T35").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues

Range("D35:T35").Select
Selection.Copy
Cells(Fila, 4).Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlValues

Fila = Fila + 1

Next i

Range("D35:U35").Select
Selection.ClearContents
Range("A1").Select
End Sub
```