

Efficacité d'un profil

18 septembre 2003

Lorsque l'on considère la descente en autorotation d'un MTA, un des critères de conception de ce boomerang est d'avoir une portance importante pour un poids faible d'où l'idée de comparer ces 2 termes pour en définir une efficacité.

On peut donc évaluer "l'efficacité" ϵ du profil en comparant la portance et le poids d'un élément de largeur de profil dy (distance perpendiculaire au plan du profil) :

$$dPoids = \rho_0 g S dy \quad dPortance = \frac{1}{2} \rho c C_z V^2 dy$$

où :
 $\rho_0 = 750 \text{ kg.m}^{-3}$: masse volumique du matériau du boom ;
 $\rho = 1.2 \text{ kg.m}^{-3}$: masse volumique de l'air ;
 S : surface en coupe du profil ;
 $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$: accélération de la pesanteur ;
 C_z : coefficient de portance du profil.

$$\epsilon = \frac{dPortance}{dPoids} = \frac{\rho V^2 c C_z}{2\rho_0 g S}$$

La comparaison des efficacités s'effectue à ρ , V , ρ_0 et g identiques ce qui revient à comparer le terme $\frac{c C_z}{S}$ pour différents profils situés à la même distance du CG sur des MTA qui tournent à la même vitesse de rotation Ω et cela pour un angle d'incidence donné.

On considère alors 4 profils de même type d'une épaisseur identique de 3 mm et de largeurs différentes $c = 25, 30, 35$ et 40 mm.

A l'aide du logiciel Xfoil, on trace les polaires de ces 4 profils pour différents nombres de Reynolds $\mathcal{R} = \frac{Vc}{\nu}$ ($\nu = 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$: viscosité cinématique de l'air). Si l'on veut comparer ces profils pour une vitesse relative V de vent donnée, il faudra comparer à des nombres de Reynolds différents. Prenons une vitesse de rotation de MTA de $\Omega = 8 \text{ tr.s}^{-1}$ et considérons que ces profils sont à $r = 10, 15$ et 20 cm du centre de gravité (CG). La vitesse $V = \Omega r$ est respectivement de l'ordre de 5, 7.5 et 10 m.s^{-1} (soit 18, 27 et 36 km/h).

	Valeur de \mathcal{R}		
c (mm)	$V=5 \text{ m/s}$	$V=7.5 \text{ m/s}$	$V=10 \text{ m/s}$
25	8 333	12 500	16 667
30	10 000	15 000	20 000
35	11 667	17 500	23 333
40	13 333	20 000	26 667

Xfoil nous fournit également une surface adimensionnée $S^* = \frac{S}{c^2}$ de chaque profil qui nous permet de déterminer S .

Une efficacité < 1 ($< 100\%$) signifie que le profil est trop lourd et pas assez porteur alors qu'une efficacité > 1 ($> 100\%$) signifie le contraire.

1 profils "DC"

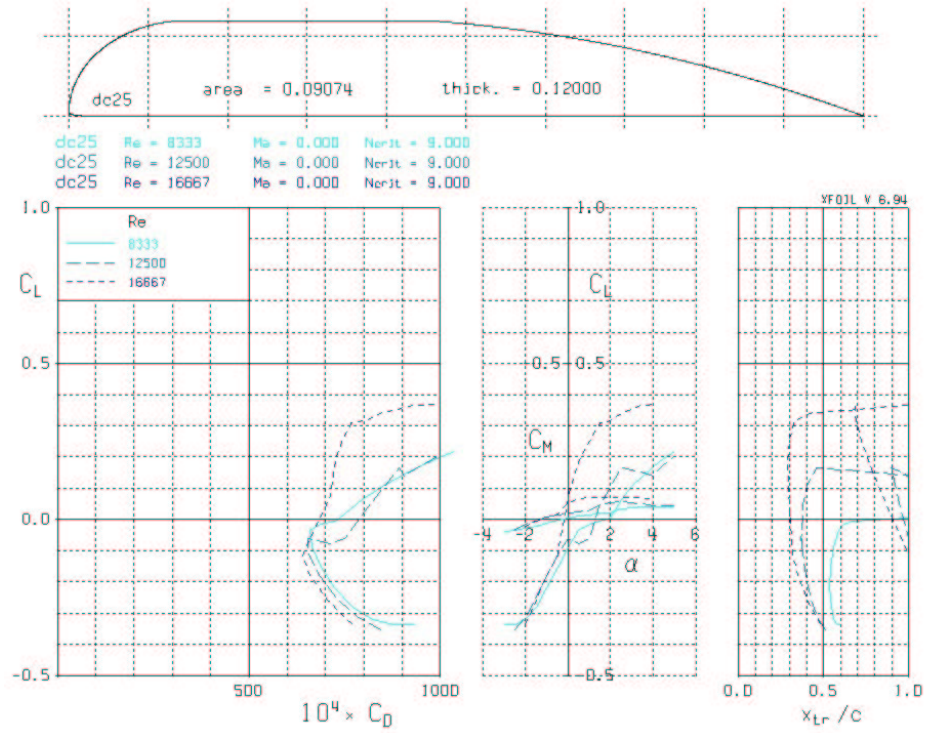


FIG. 1 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{25}$.

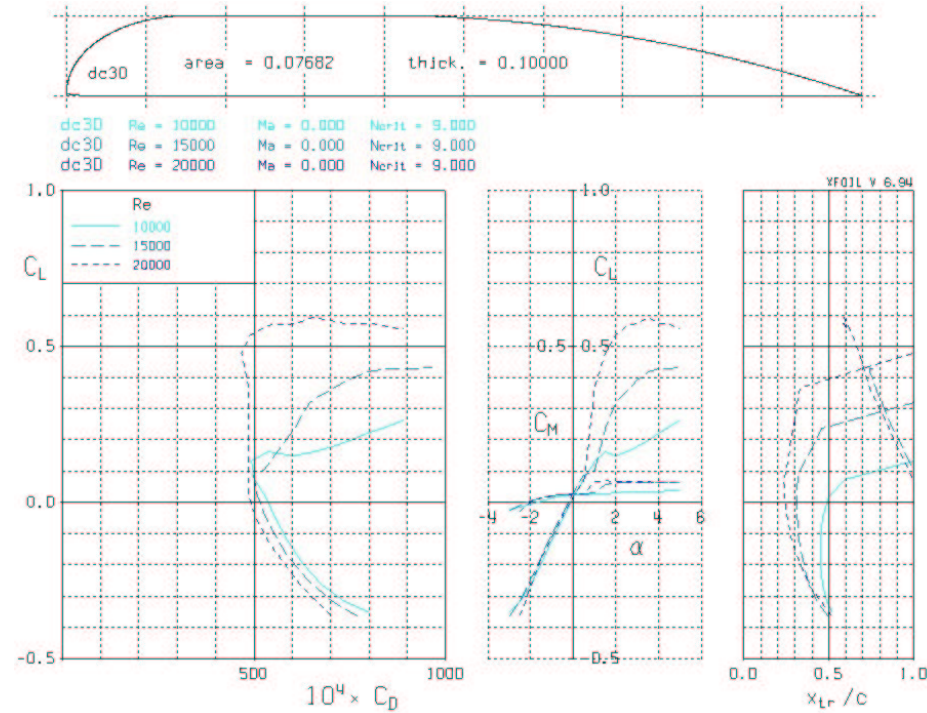


FIG. 2 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{30}$.

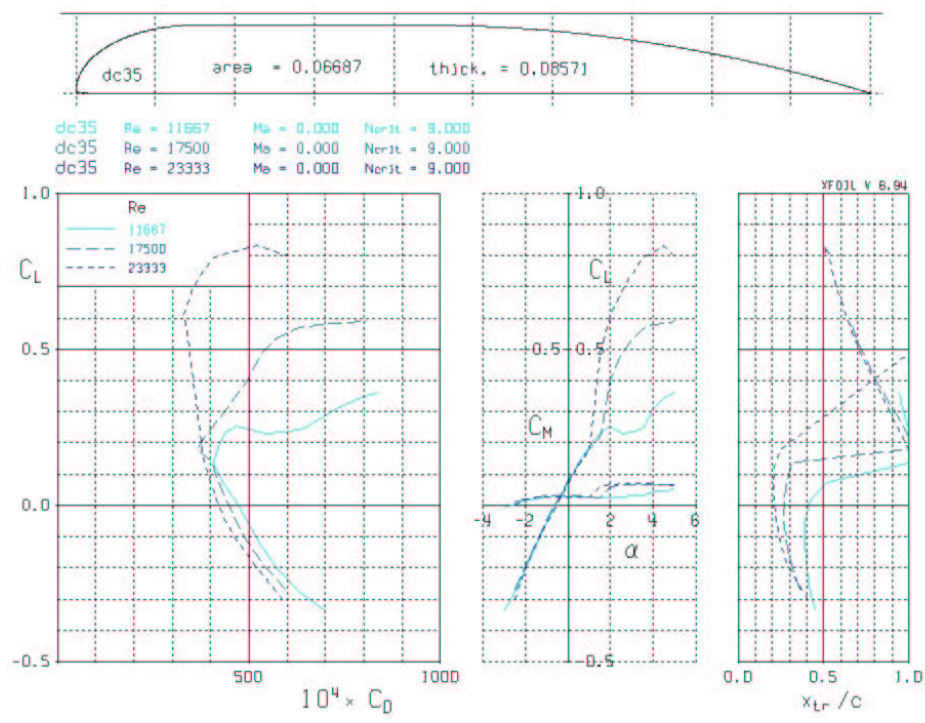


FIG. 3 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{35}$.

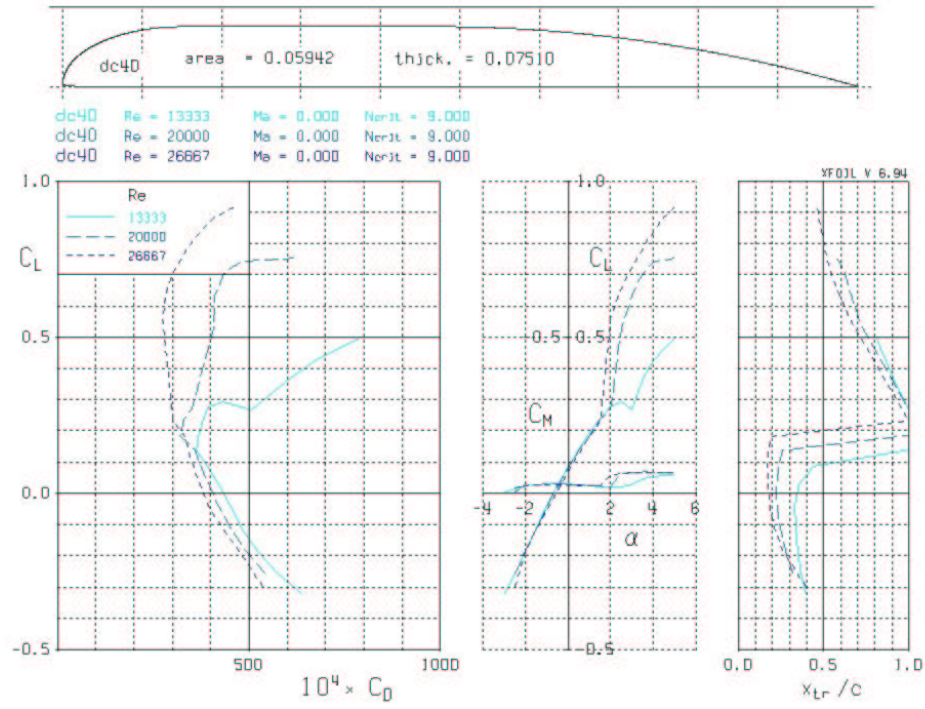
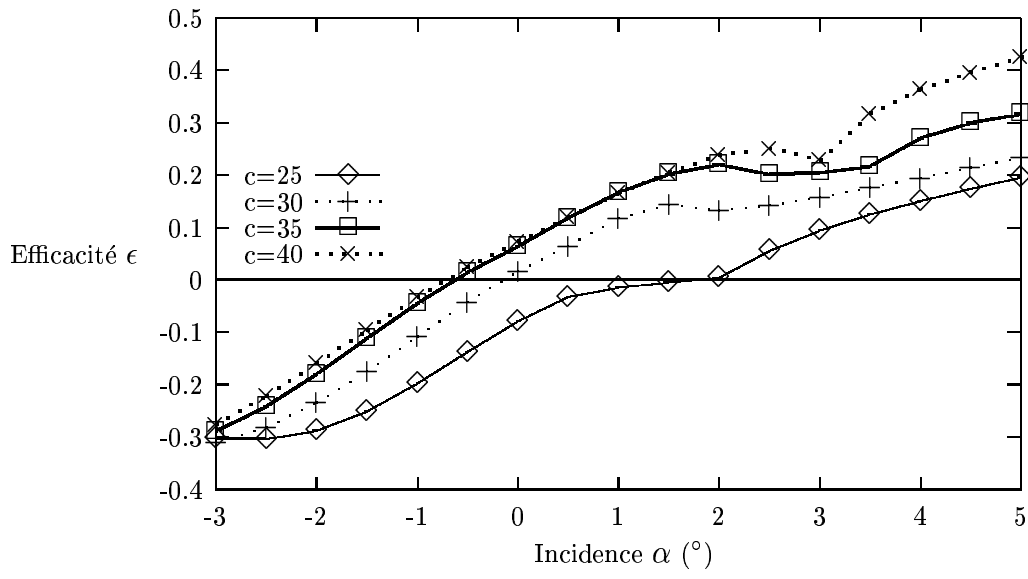
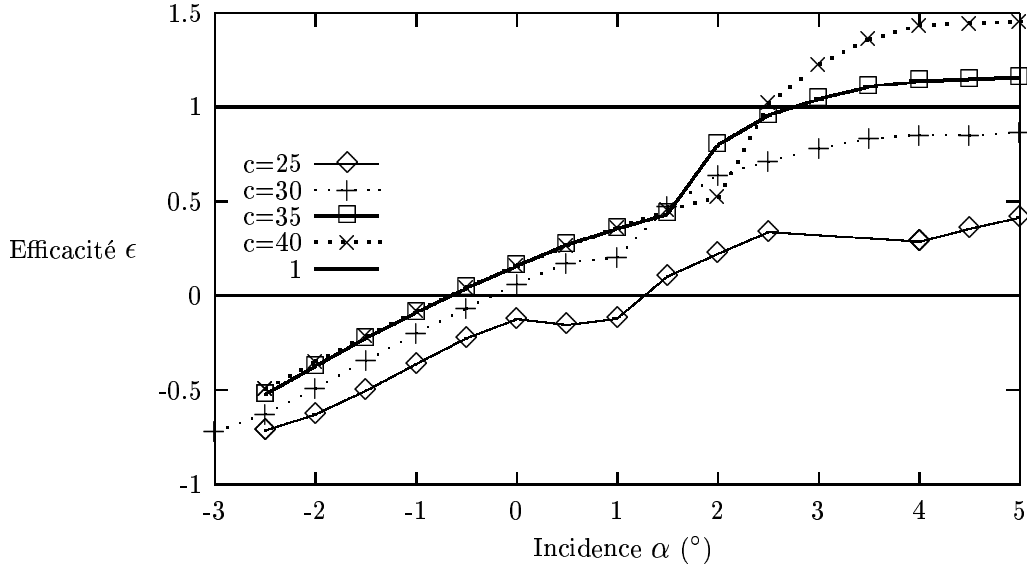


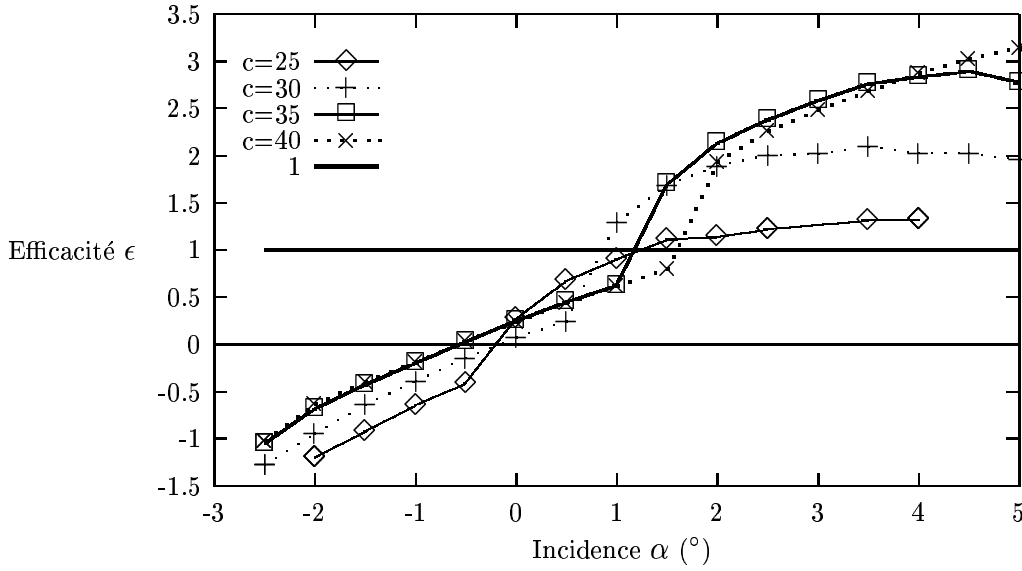
FIG. 4 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{40}$.



$v = 5 \text{ m.s}^{-1}$



$v = 7.5 \text{ m.s}^{-1}$



$v = 10 \text{ m.s}^{-1}$

2 profils "Gottingen 439" modifiés

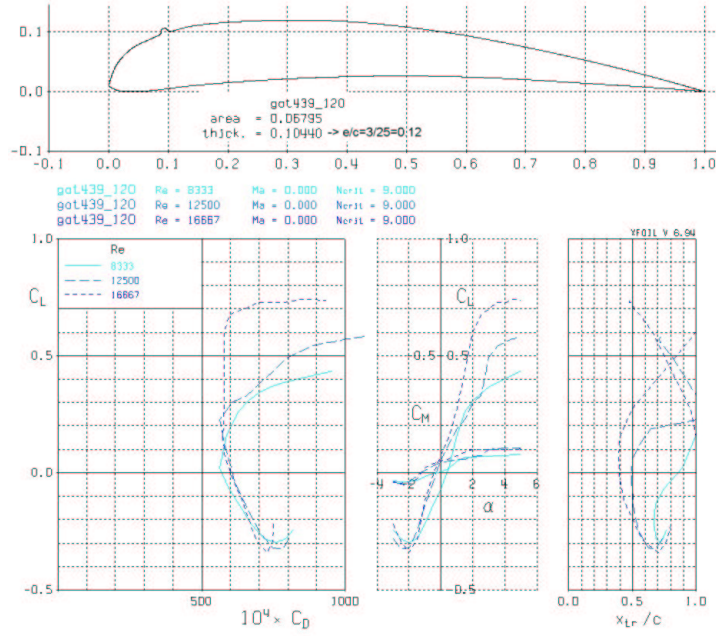


FIG. 5 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{25}$.

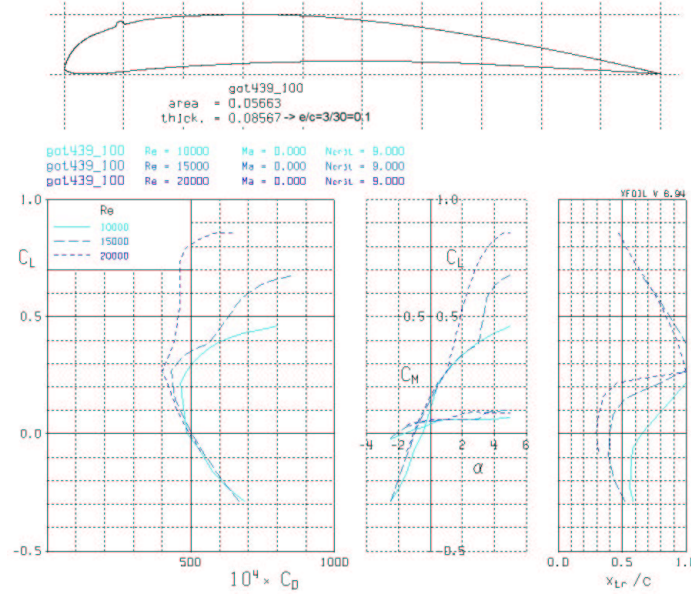


FIG. 6 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{30}$.

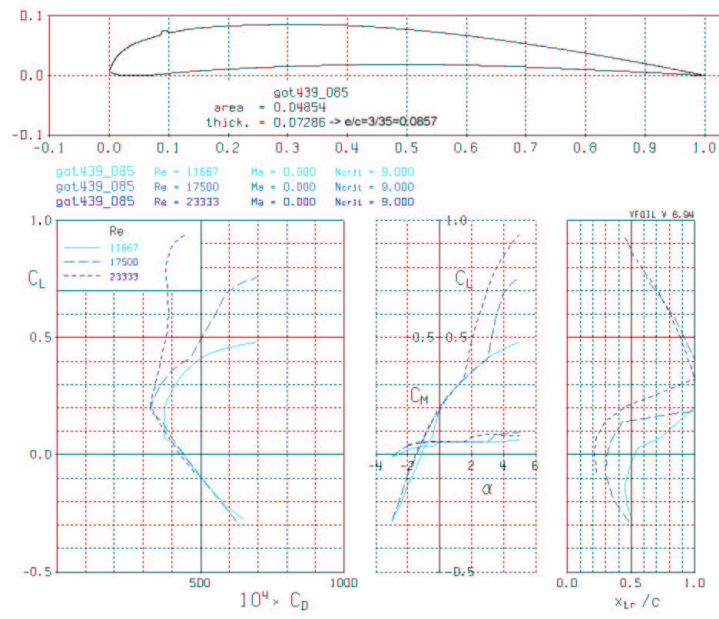


FIG. 7 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{35}$.

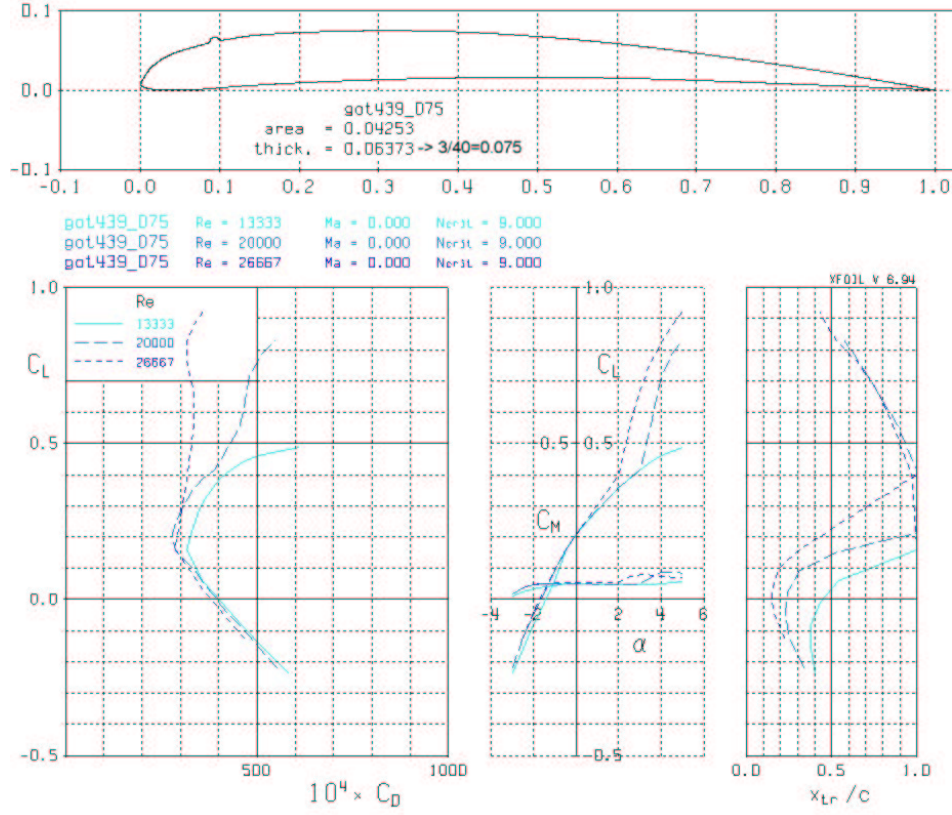
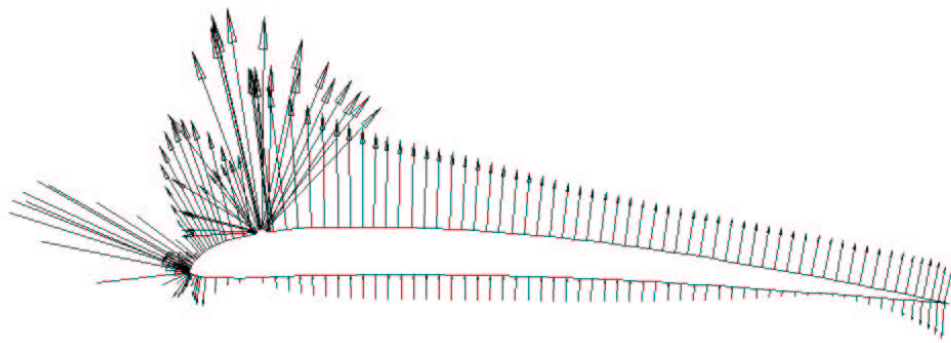
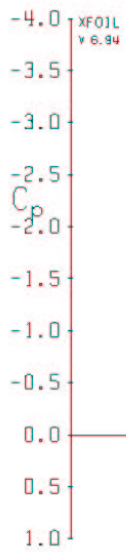


FIG. 8 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{40}$.

On remarquera le "saut" de $C_z(\alpha)$ pour $\mathcal{R} = 17500$ et 23333 qui provient de l'effet du turbulateur qui permet un recollement de la couche limite sur le bord de fuite de l'extrados. Ceci ayant pour conséquence d'éviter le décrochage : le C_x augmente que très peu et le C_z continue à augmenter.



XF01L
y 6.94



got439_075

$Re = 0.027 \times 10^6$

$\alpha = 2.0000^\circ$

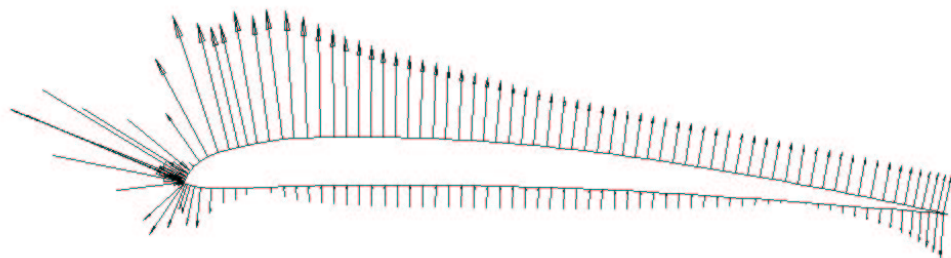
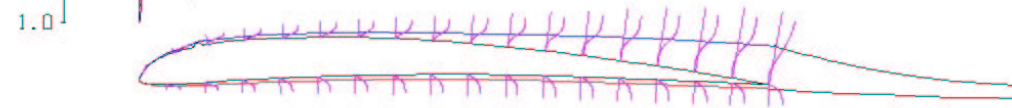
$C_L = 0.3994$

$C_M = -0.0551$

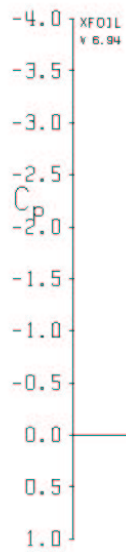
$C_D = 0.03183$

$L/D = 12.55$

$N_{cr} = 9.00$



XF01L
y 6.94



got439_75

$Re = 0.027 \times 10^6$

$\alpha = 2.0000^\circ$

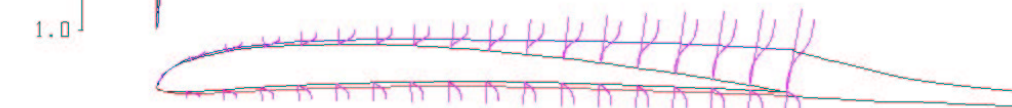
$C_L = 0.3612$

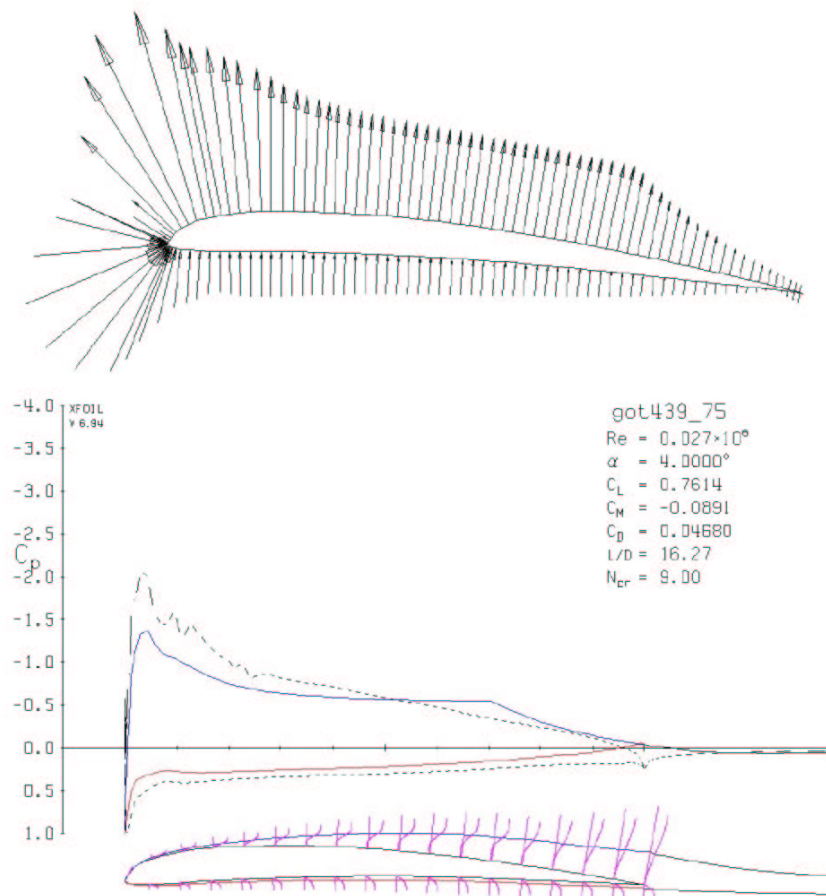
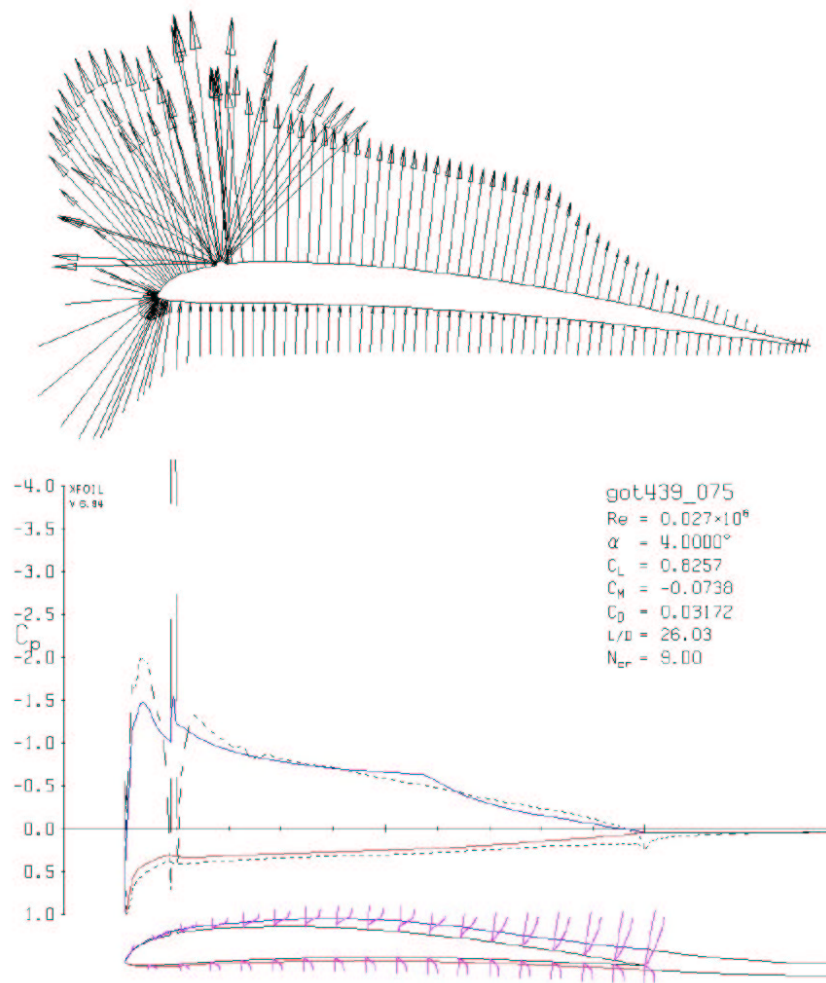
$C_M = -0.0476$

$C_D = 0.03199$

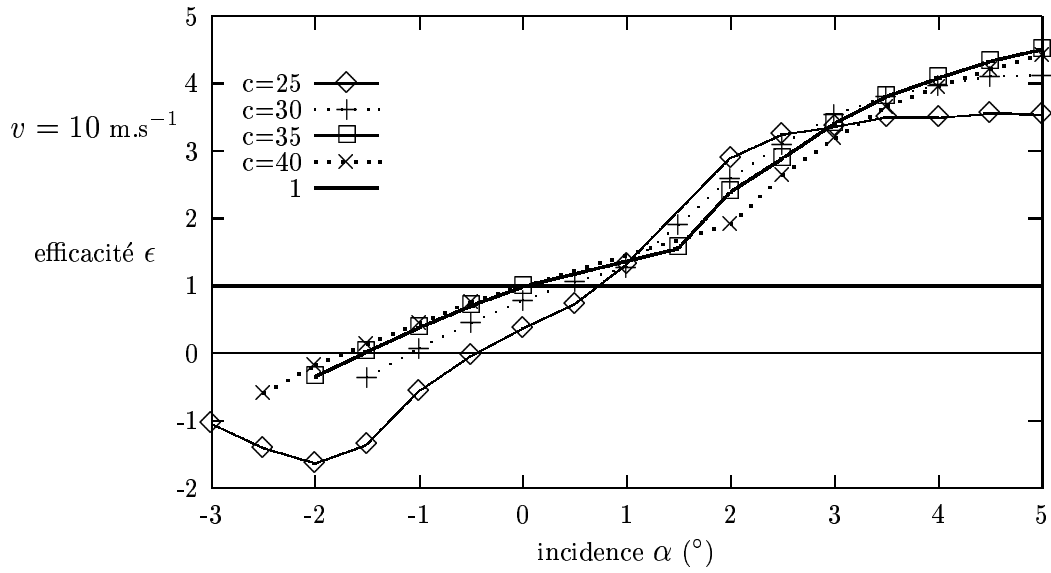
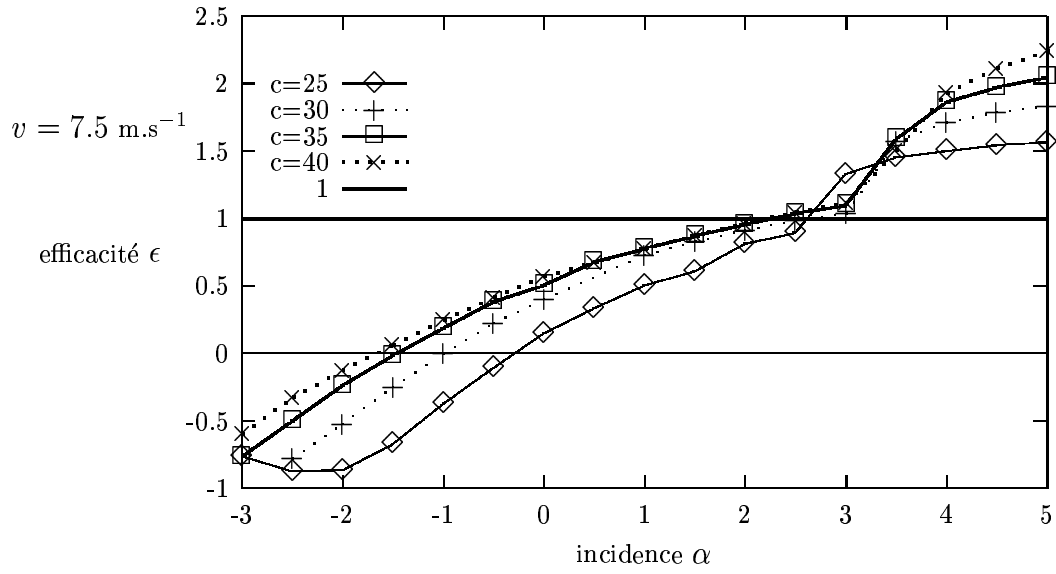
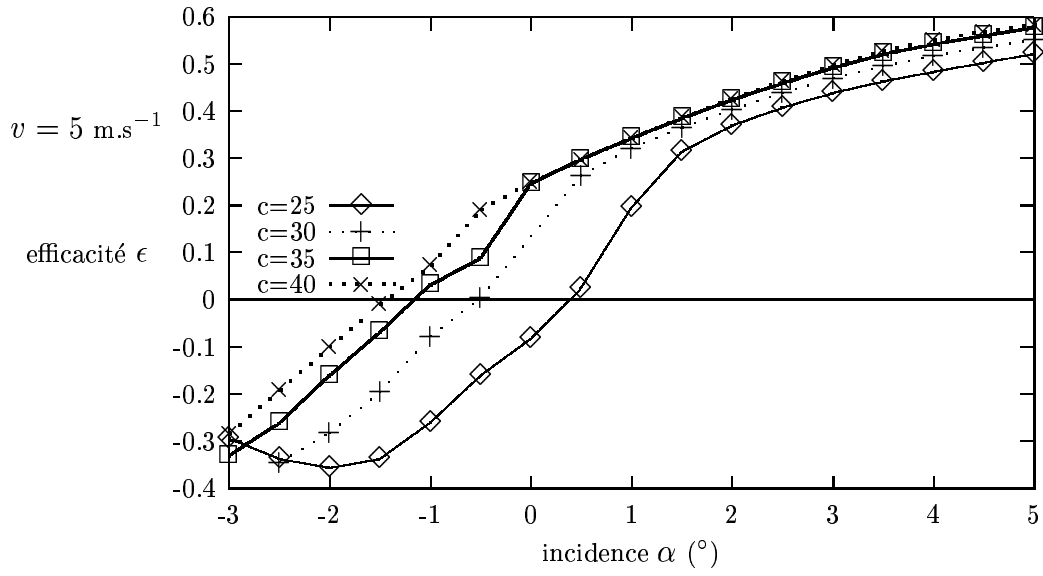
$L/D = 11.29$

$N_{cr} = 9.00$





Pour $\alpha = 4^\circ$ on remarque que la couche limite recolle sur l'extrados avec turbulateur alors que ce n'est pas le cas sans turbulateur.



3 profils "Gottingen 440"

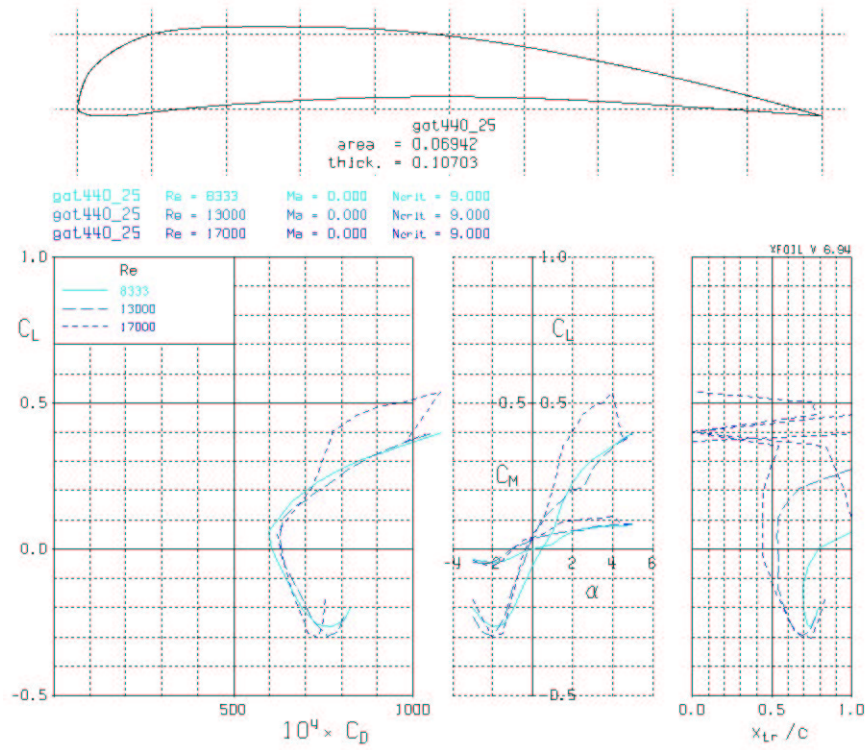


FIG. 9 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{25}$.

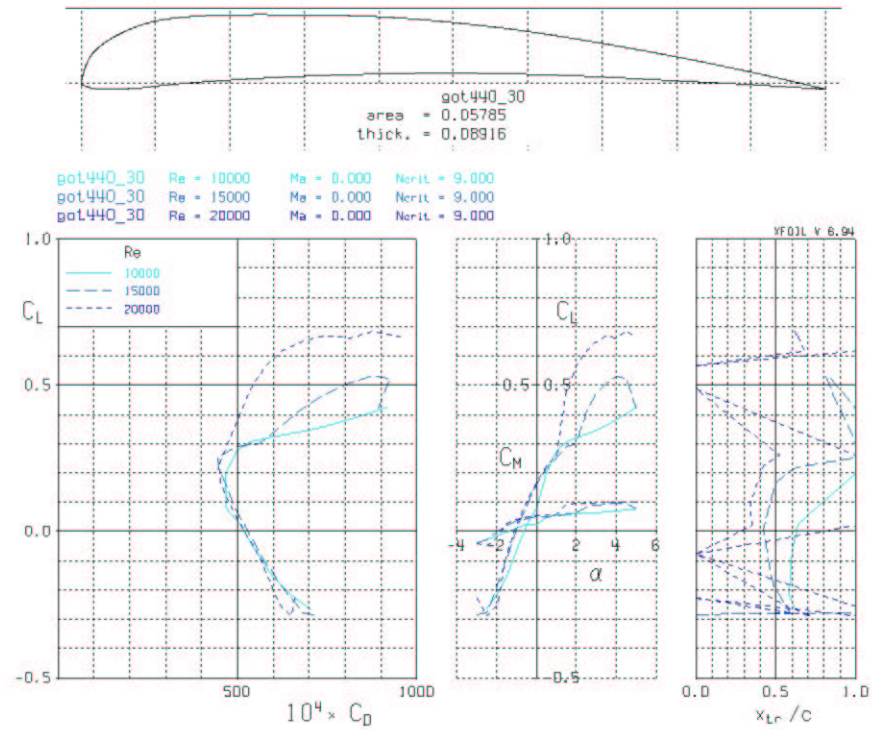


FIG. 10 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{30}$.

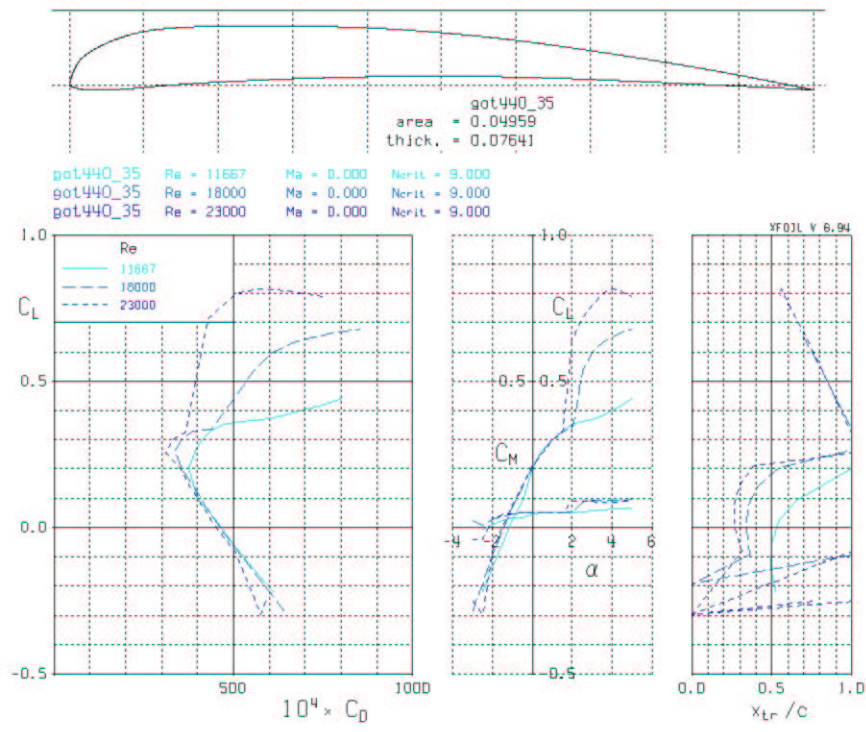


FIG. 11 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{\varepsilon}{c} = \frac{3}{35}$.

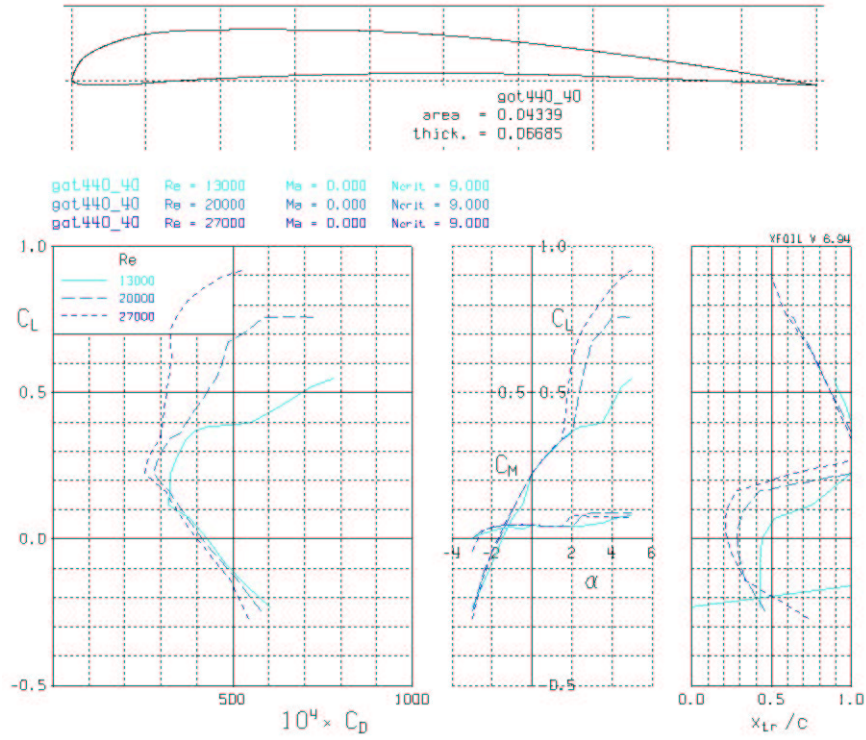
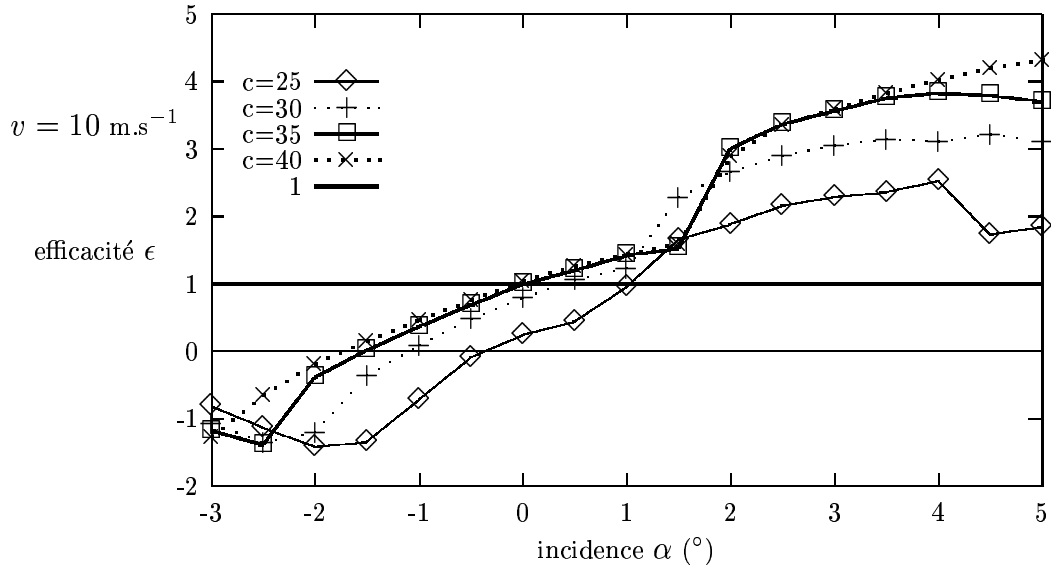
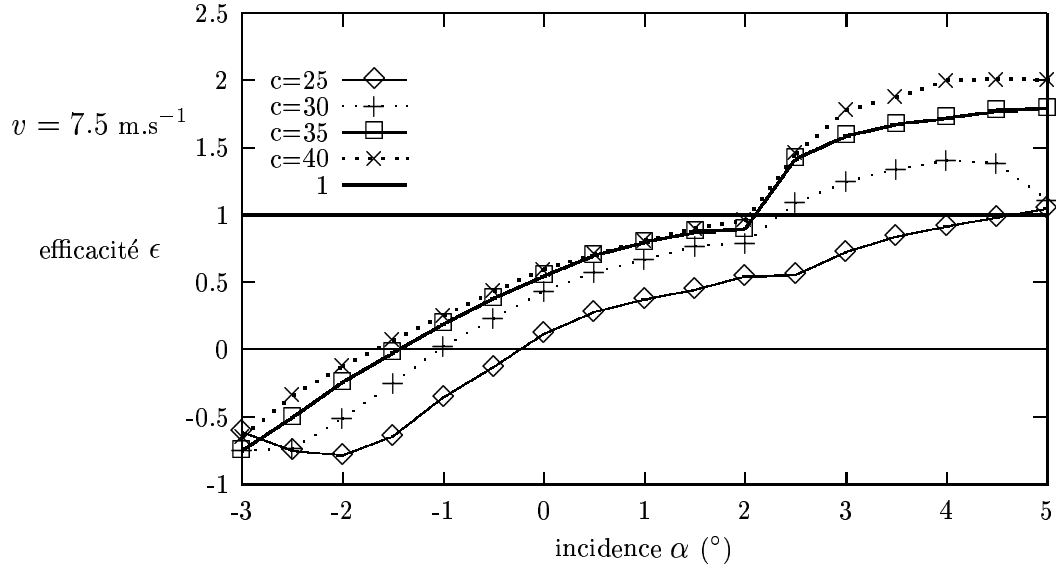
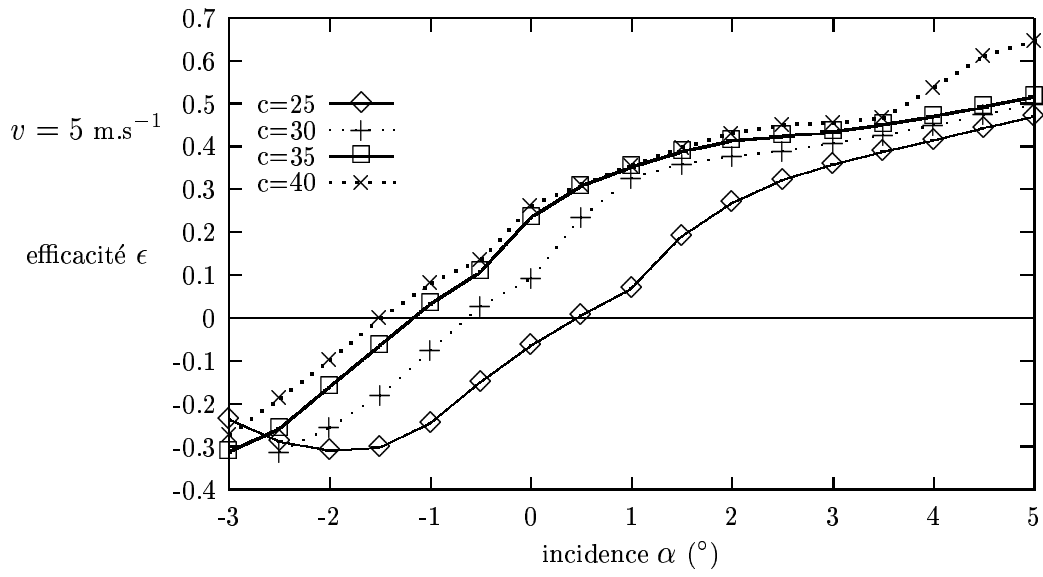


FIG. 12 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{\varepsilon}{c} = \frac{3}{40}$.



Le profil précédent est sans turbulateur. Examinons l'utilité de mettre un turbulateur. Pour ce profil uniquement, les surfaces adimensionnées S^* ont été considérées inchangées ce qui revient à ne pas prendre en compte le poids du turbulateur.

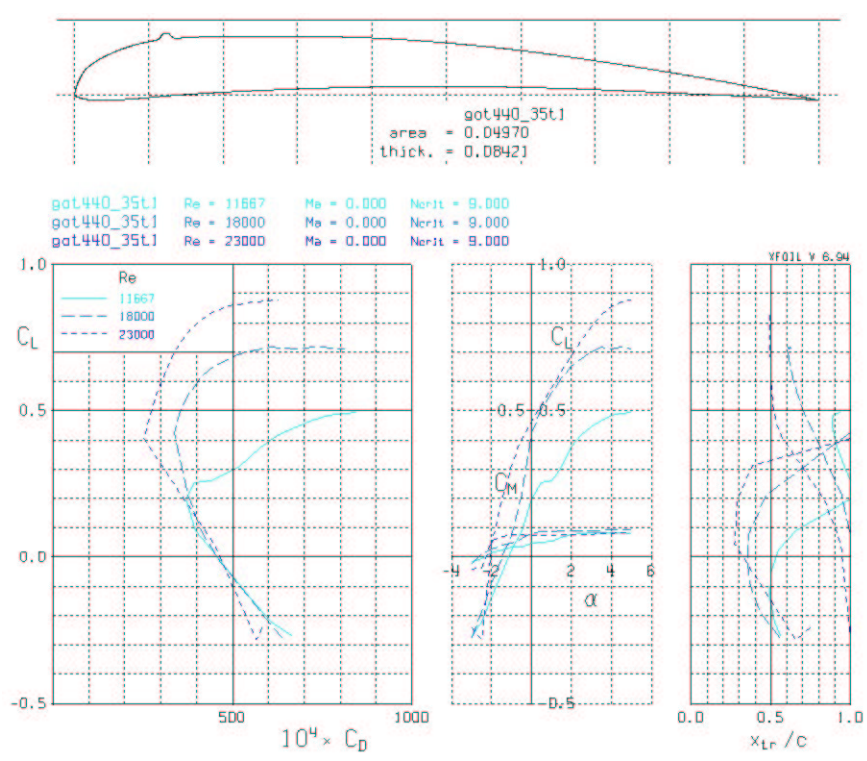


FIG. 13 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{35}$.

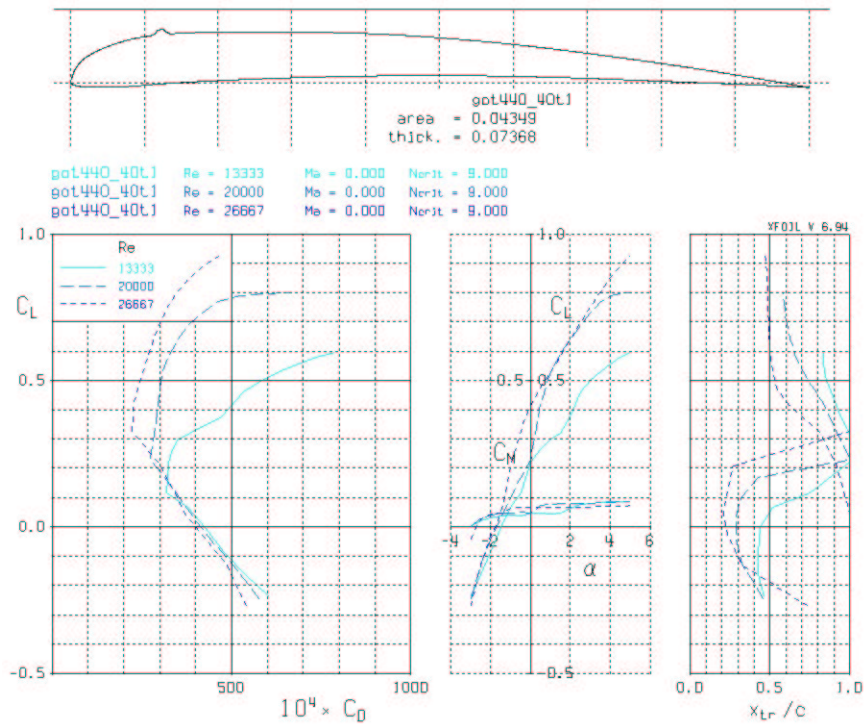
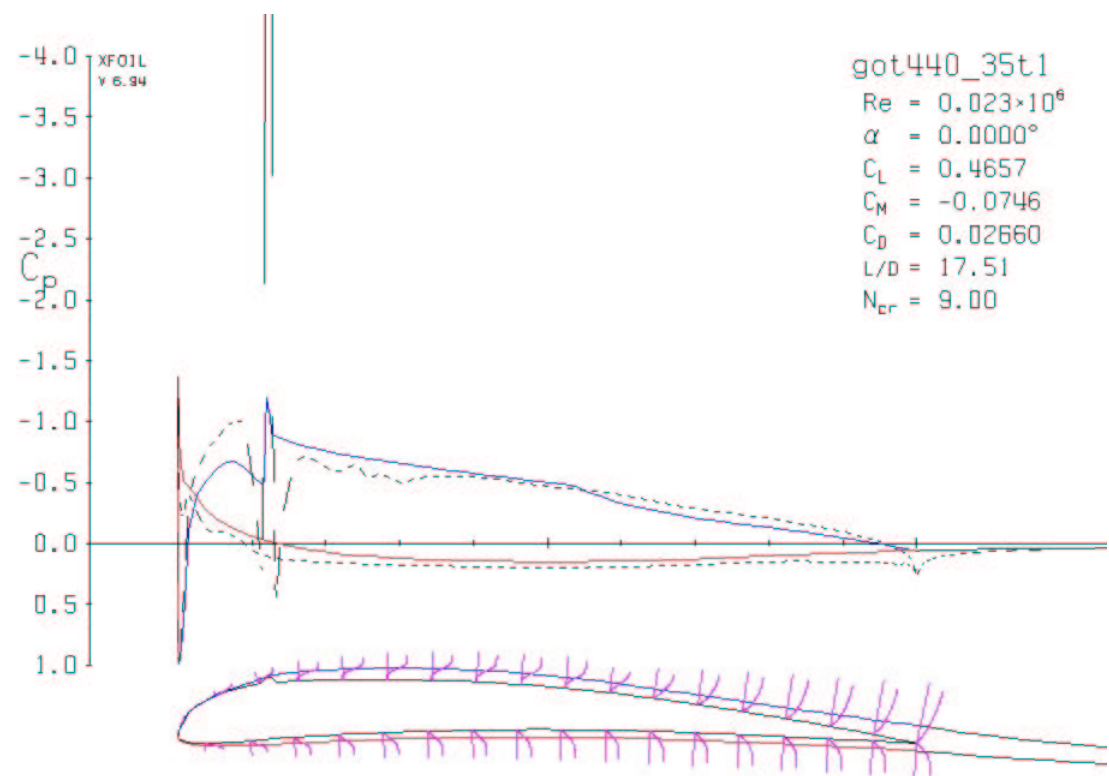
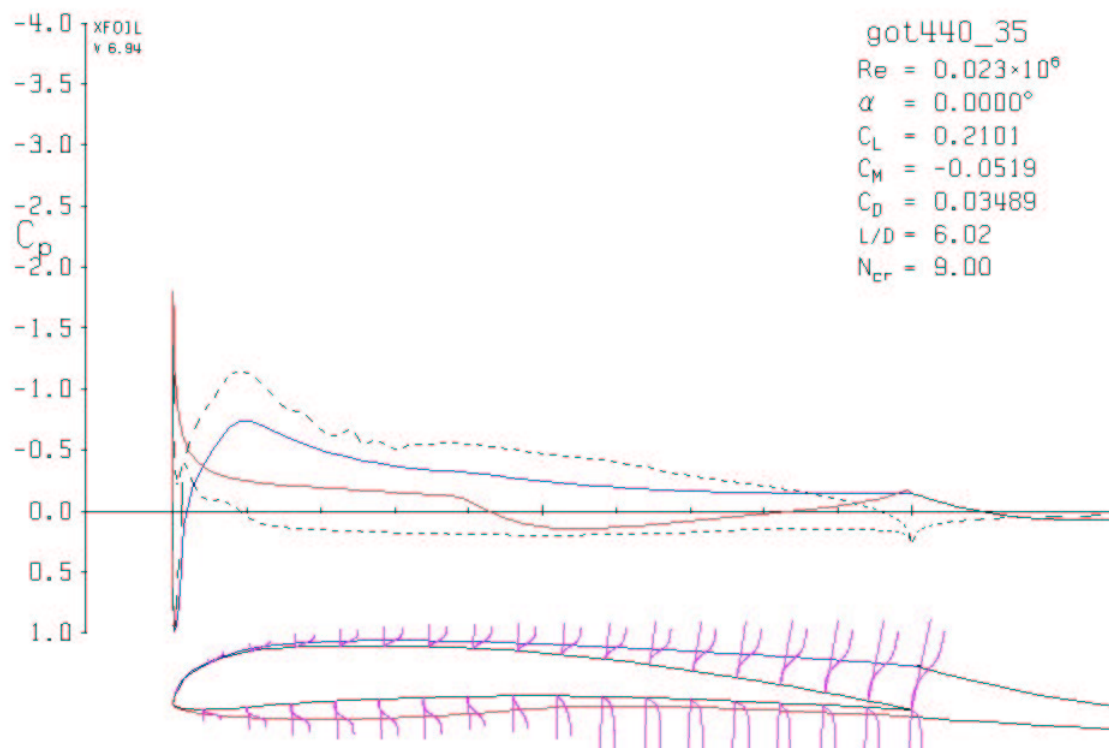
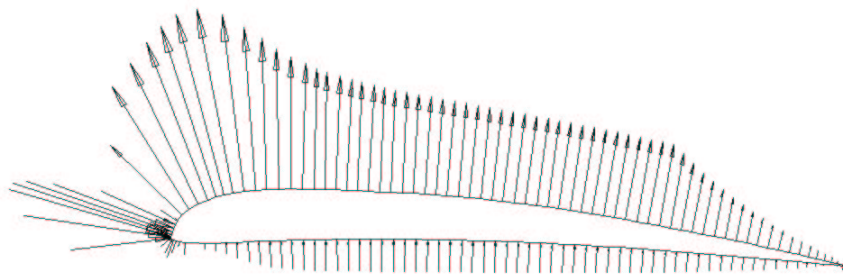
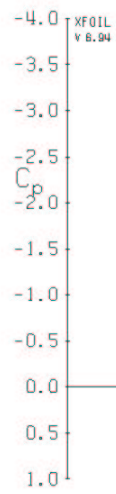


FIG. 14 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{40}$.



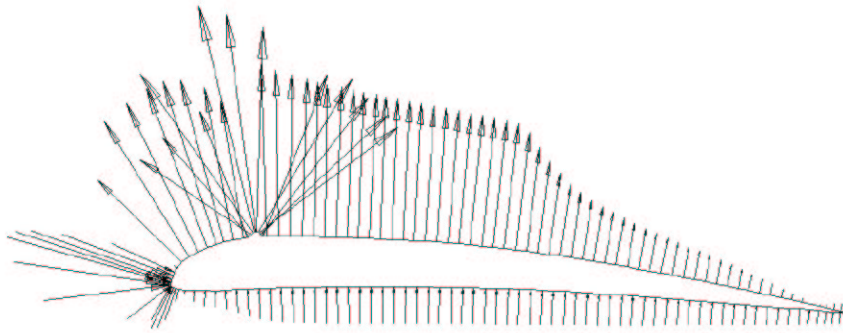
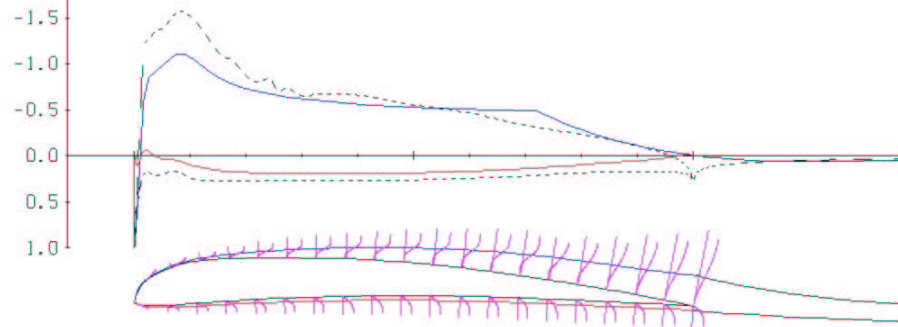


XFOIL
v 6.94

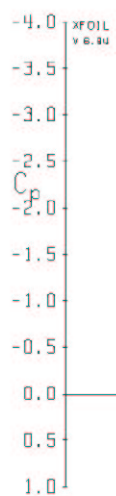


got440_35

Re = 0.023×10^6
 α = 2.0000°
 C_L = 0.6406
 C_M = -0.0907
 C_D = 0.04166
L/D = 15.38
 N_{cr} = 9.00

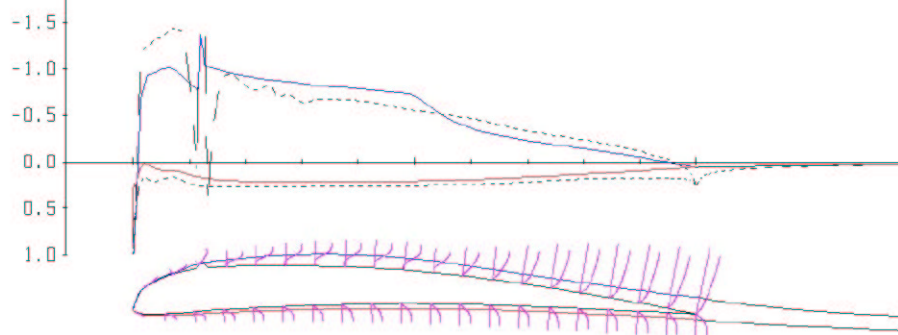


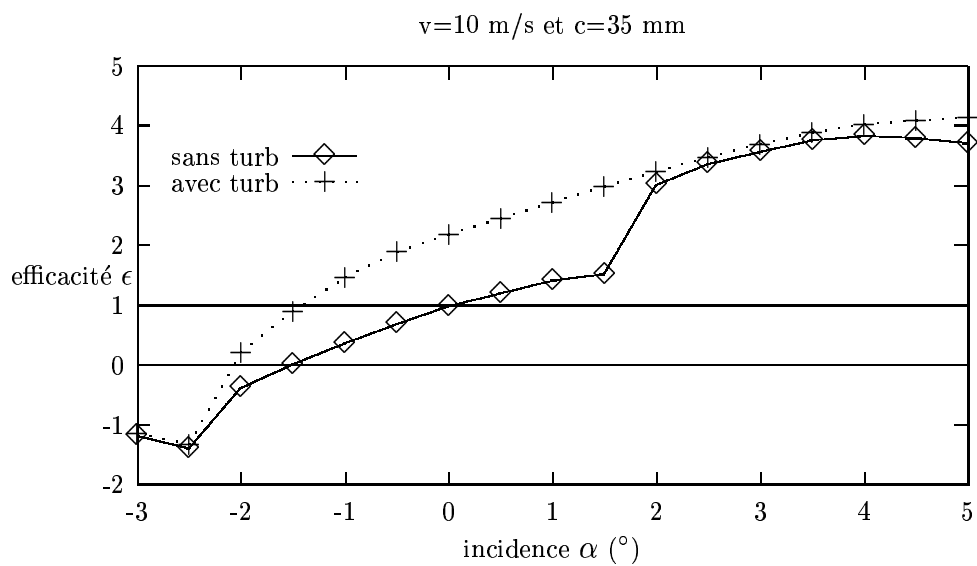
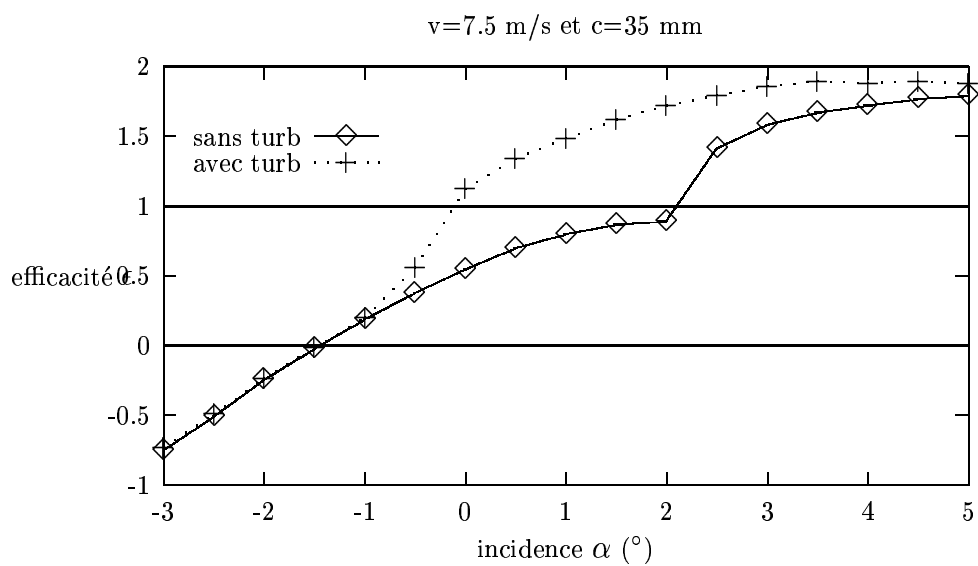
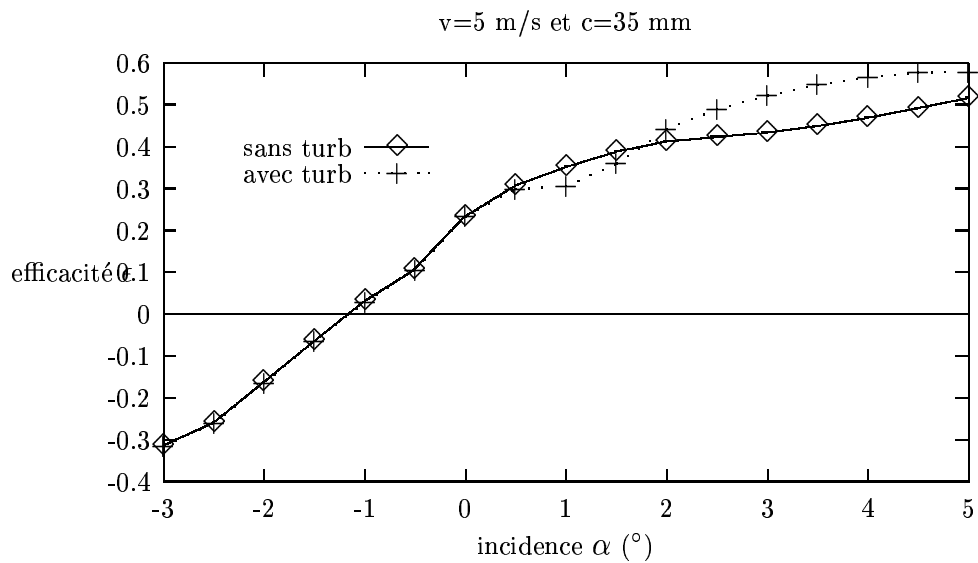
XFOIL
v 6.94



got440_35t1

Re = 0.023×10^6
 α = 2.0000°
 C_L = 0.6892
 C_M = -0.0759
 C_D = 0.03335
L/D = 20.67
 N_{cr} = 9.00

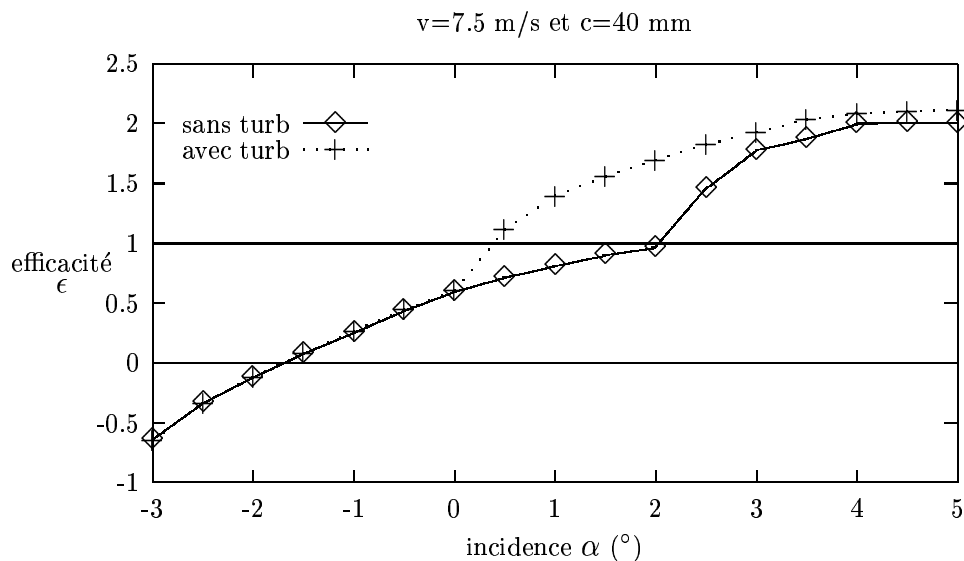
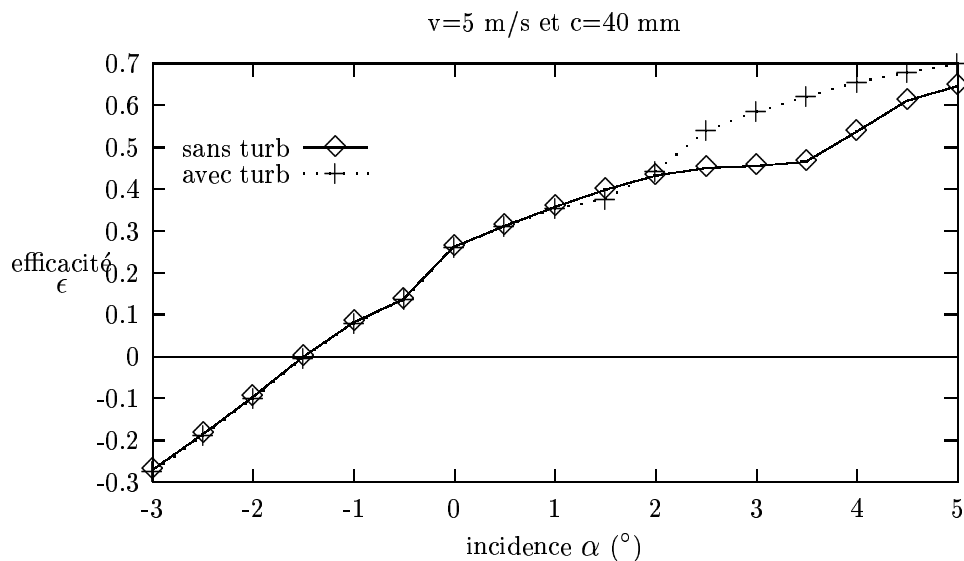


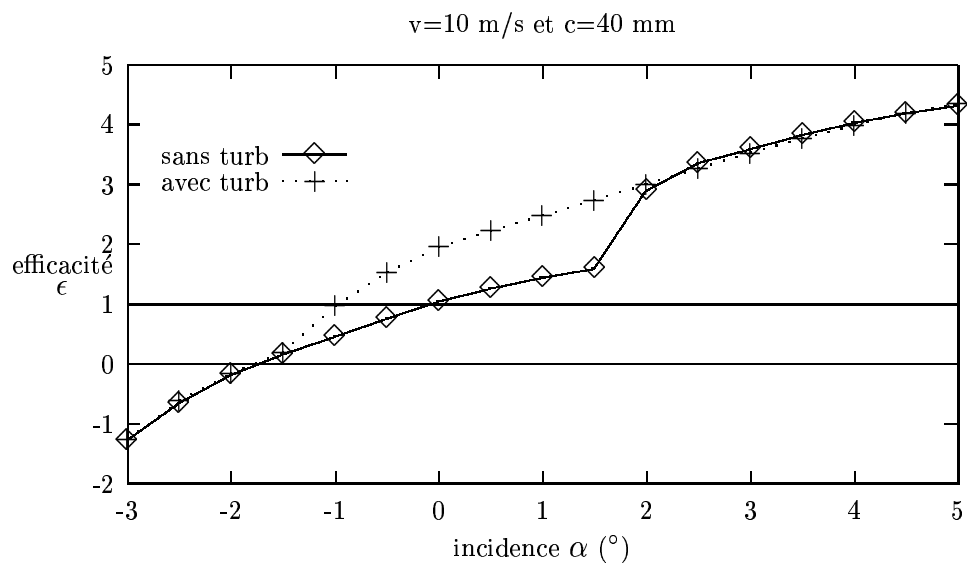


Pour les vitesses de 7.5 m/s et 10 m/s, on remarque un saut des courbes qui provient du recollement de la couche limite sur le bord de fuite de l'extrados. Ce saut n'est pas situé au même angle d'incidence lorsque l'on a ou pas un turbulateur. On peut donc dire, par exemple, que, pour $v = 7.5$ m/s, ce profil sans turbulateur pour $\alpha = 2.5^\circ$ est aussi efficace que le même profil avec turbulateur pour $\alpha = 0.8^\circ$ environ. Or en comparant les coefficient de trainée on s'aperçoit que la trainée à $\alpha = 0.8^\circ$ avec turbulateur est plus élevée que celle à $\alpha = 2.5^\circ$ sans turbulateur :

$$\underbrace{C_{x \text{ sans turbulateur}}(\alpha = 2.5^\circ)}_{0.054} > \underbrace{C_{x \text{ avec turbulateur}}(\alpha = 0.8^\circ)}_{0.038}$$

Il est donc préférable de mettre un turbulateur en sachant qu'il faudra diminuer l'incidence du profil par rapport au même boom sans turbulateur!!!





4 profils "Gottingen 441"

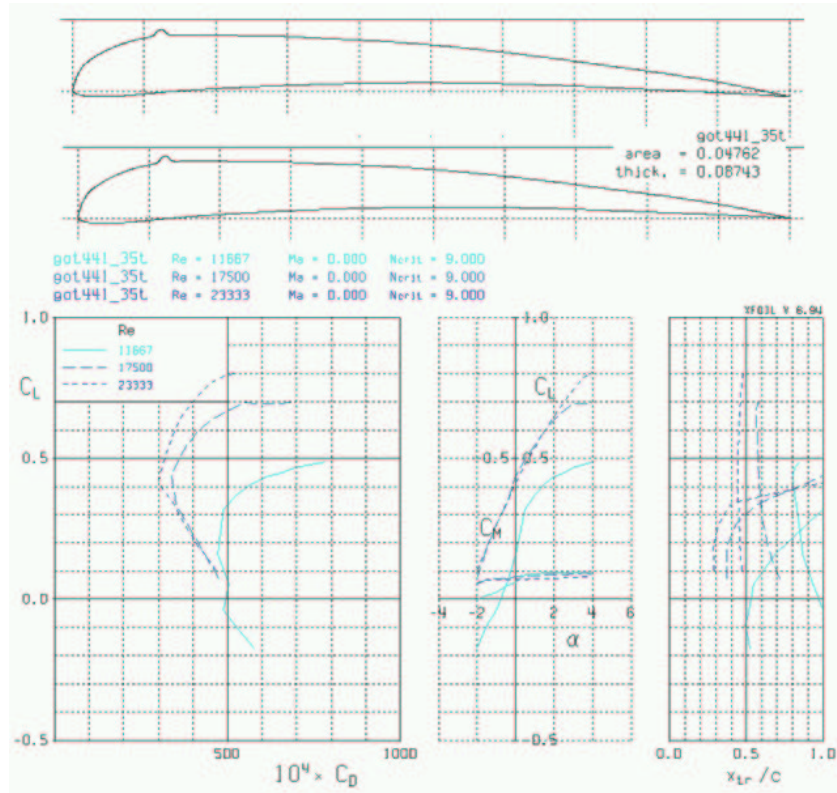


FIG. 15 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{\varepsilon}{c} = \frac{3}{35}$.

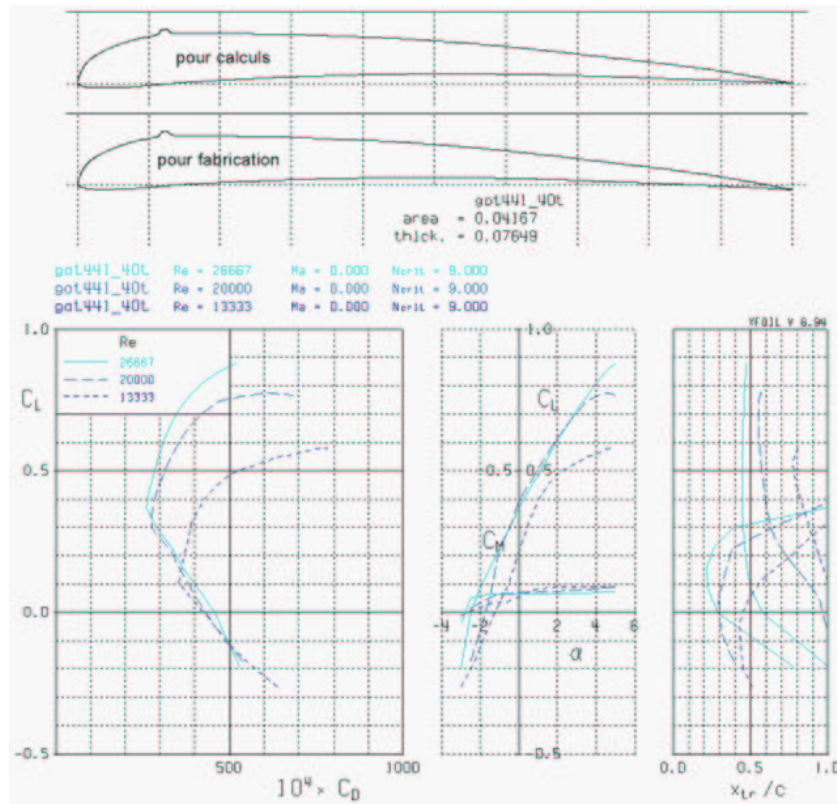
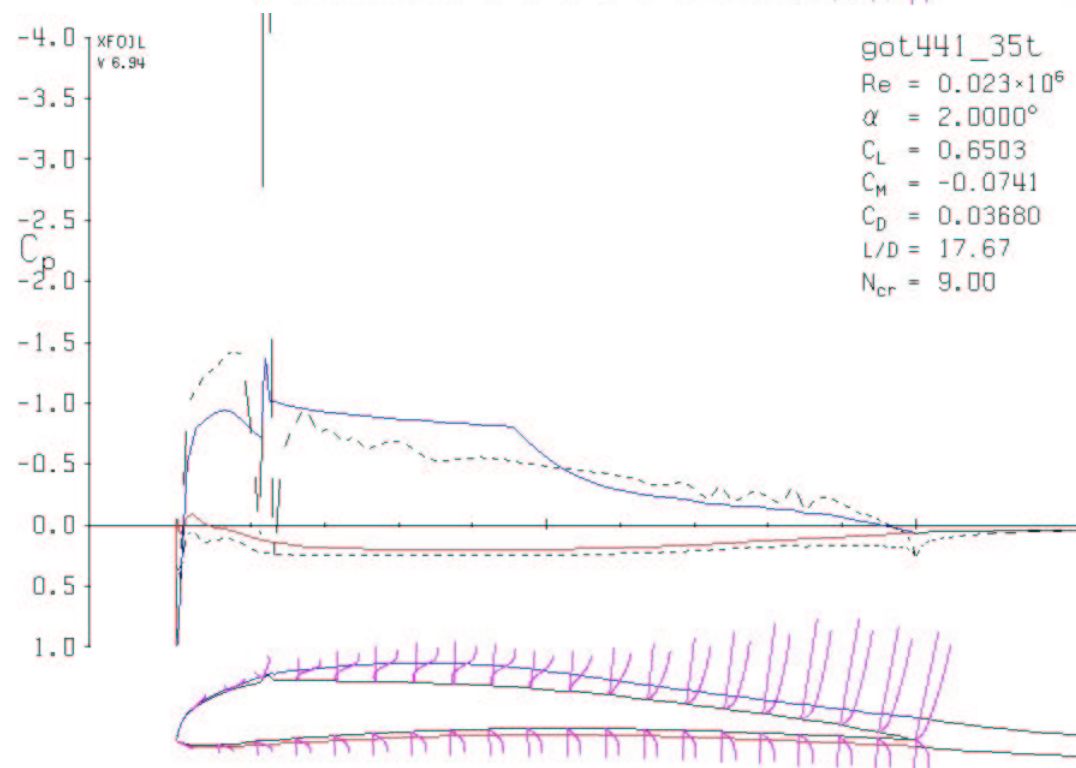
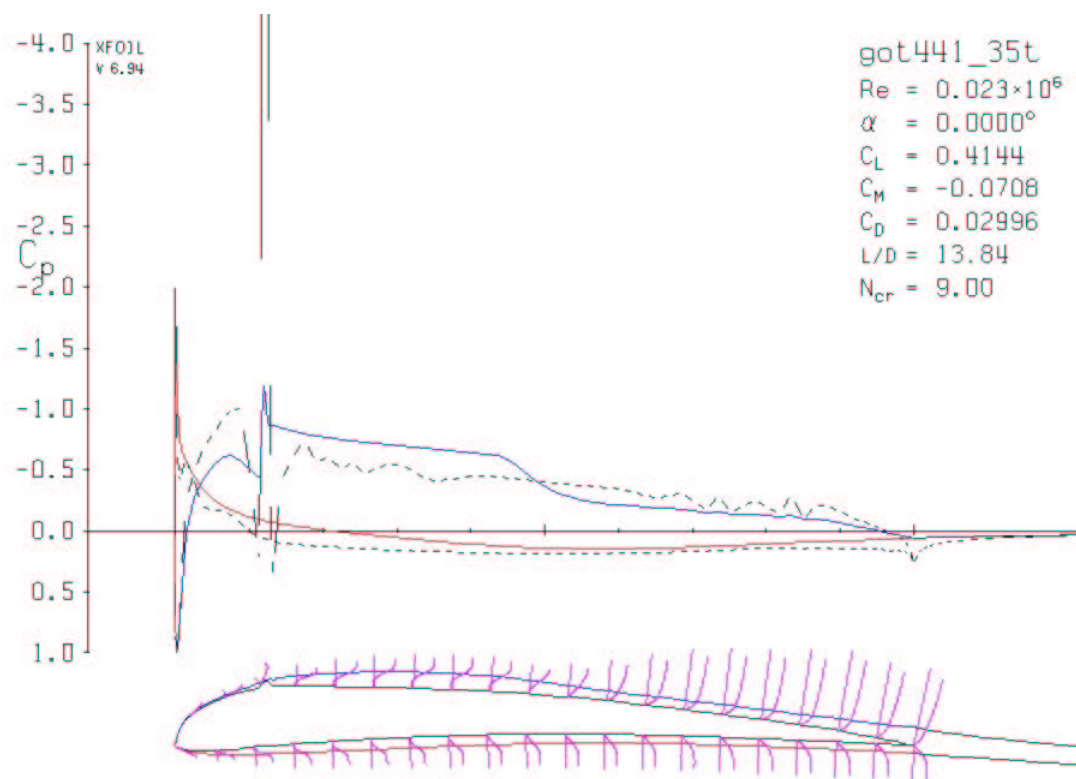
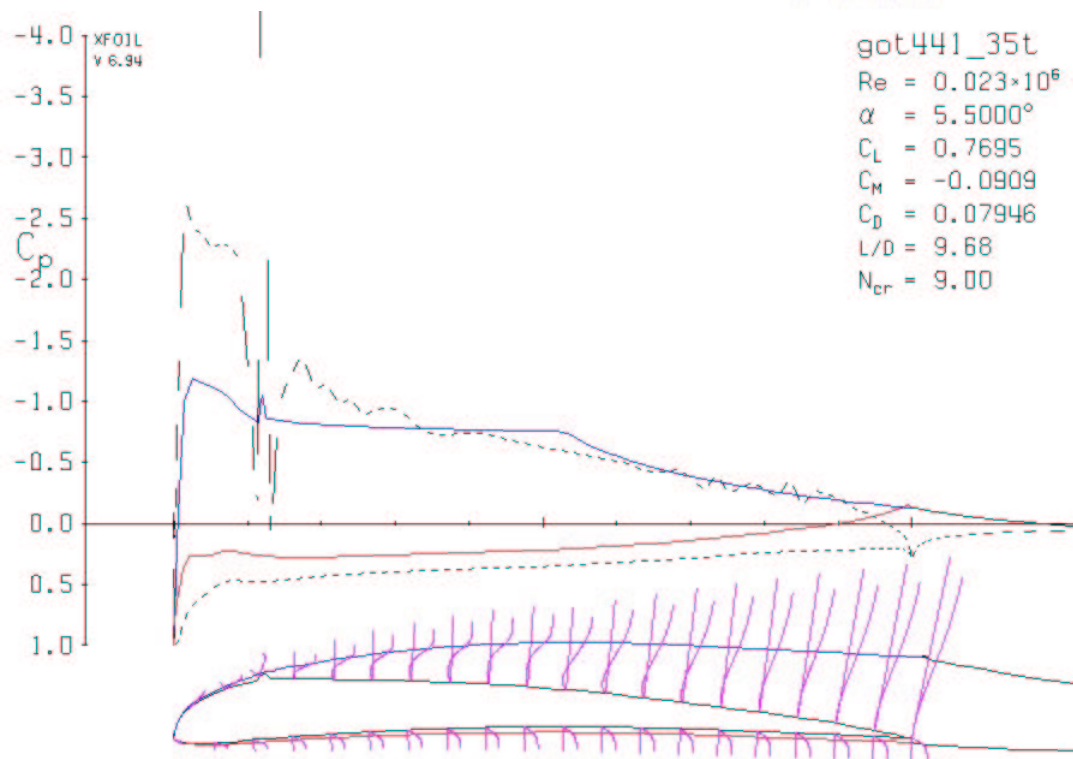
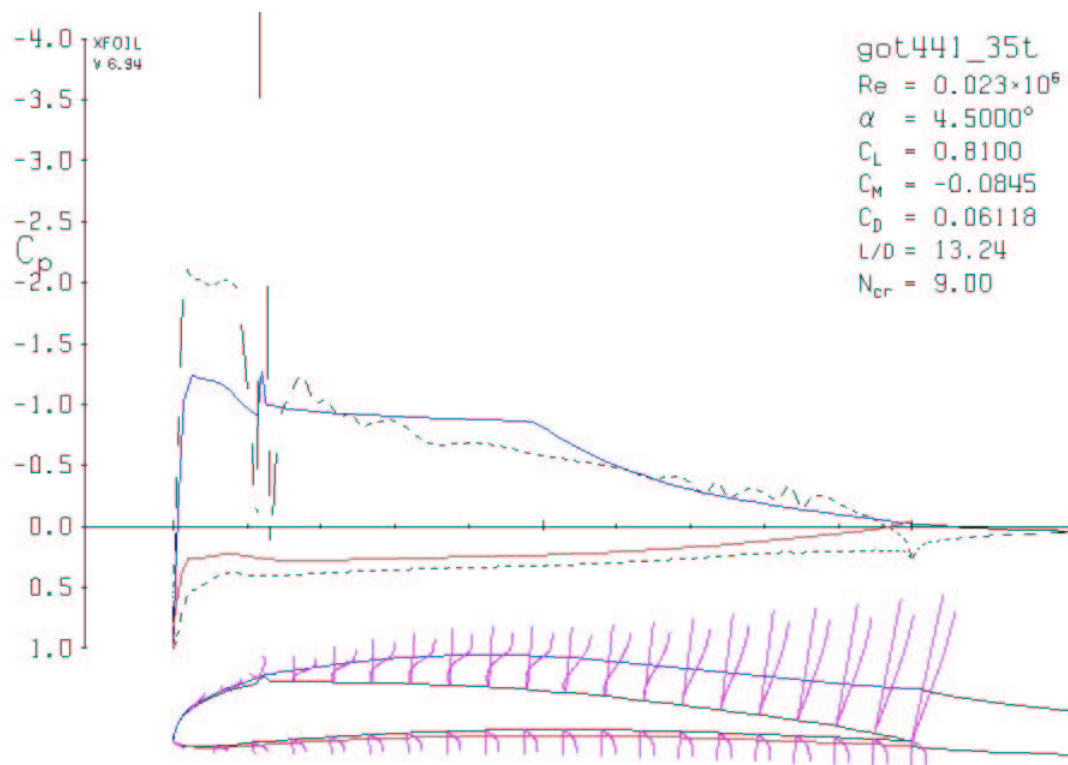
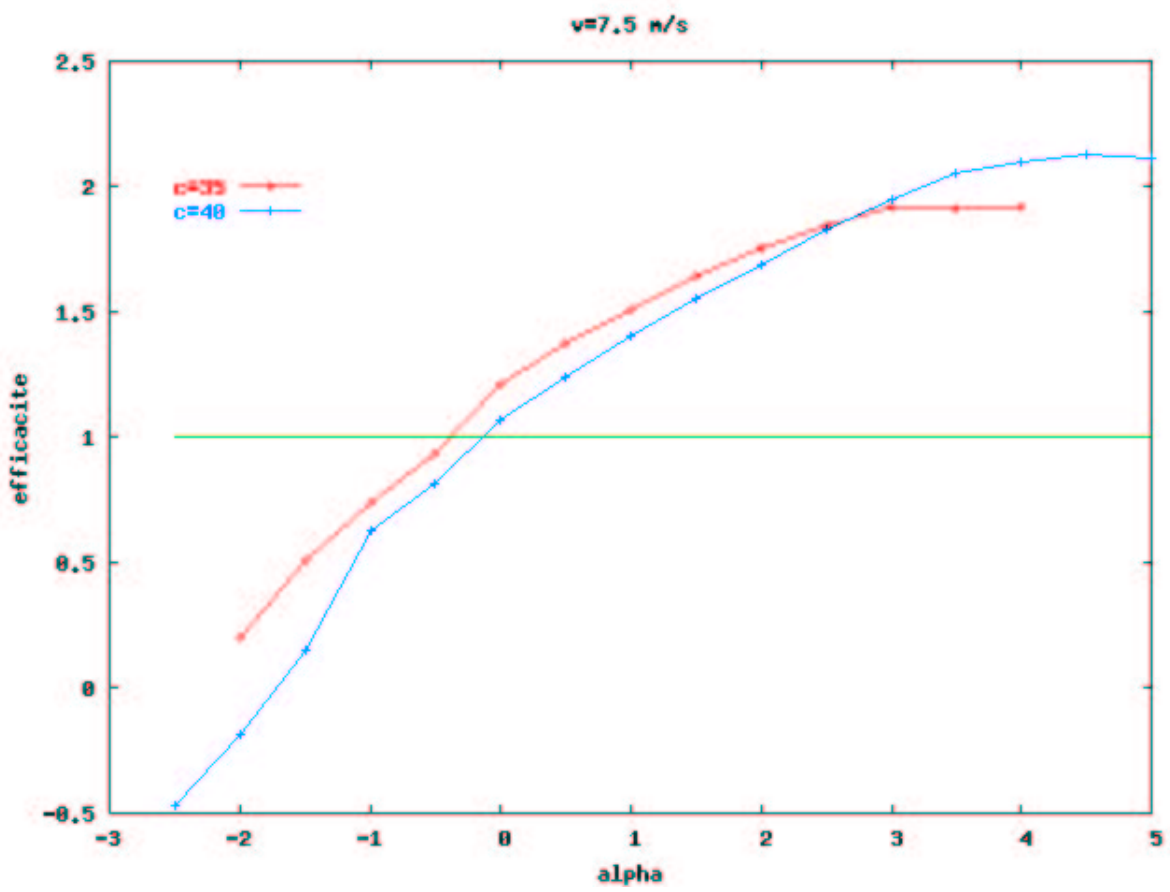
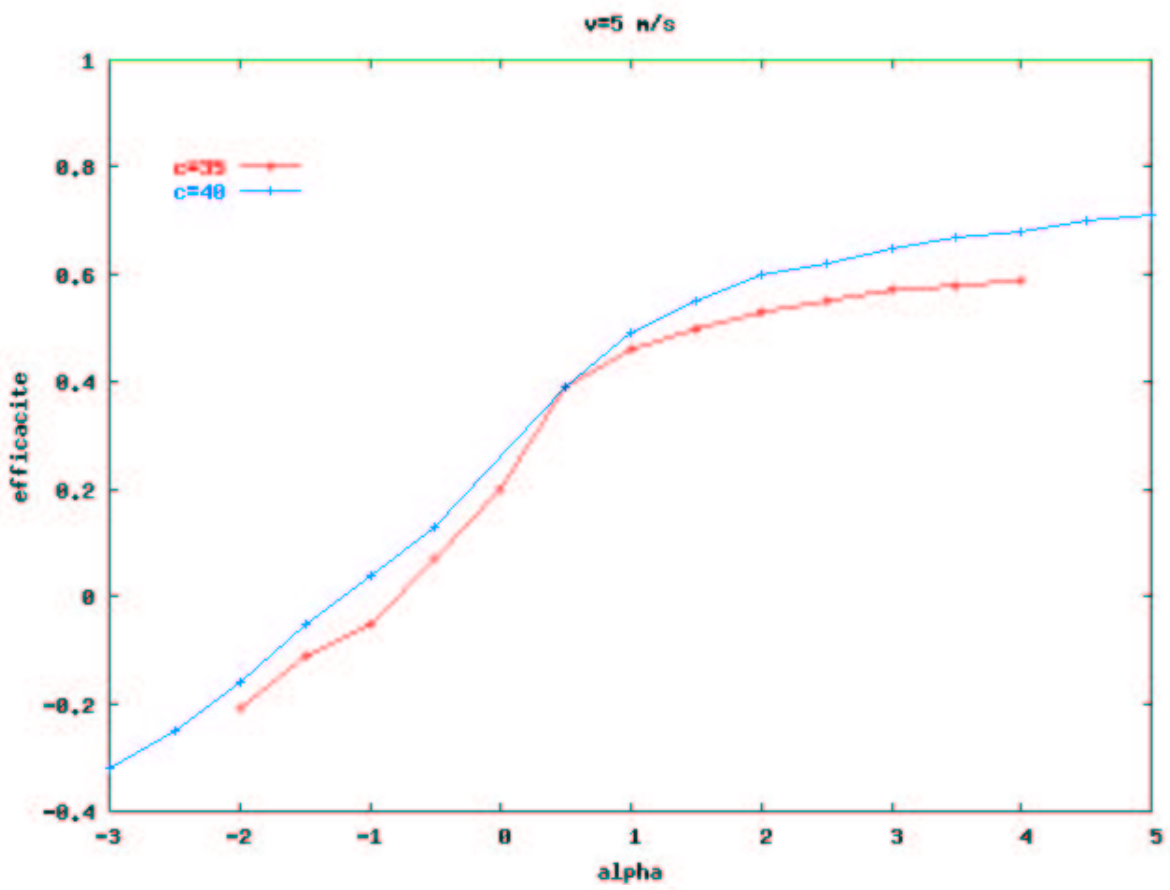
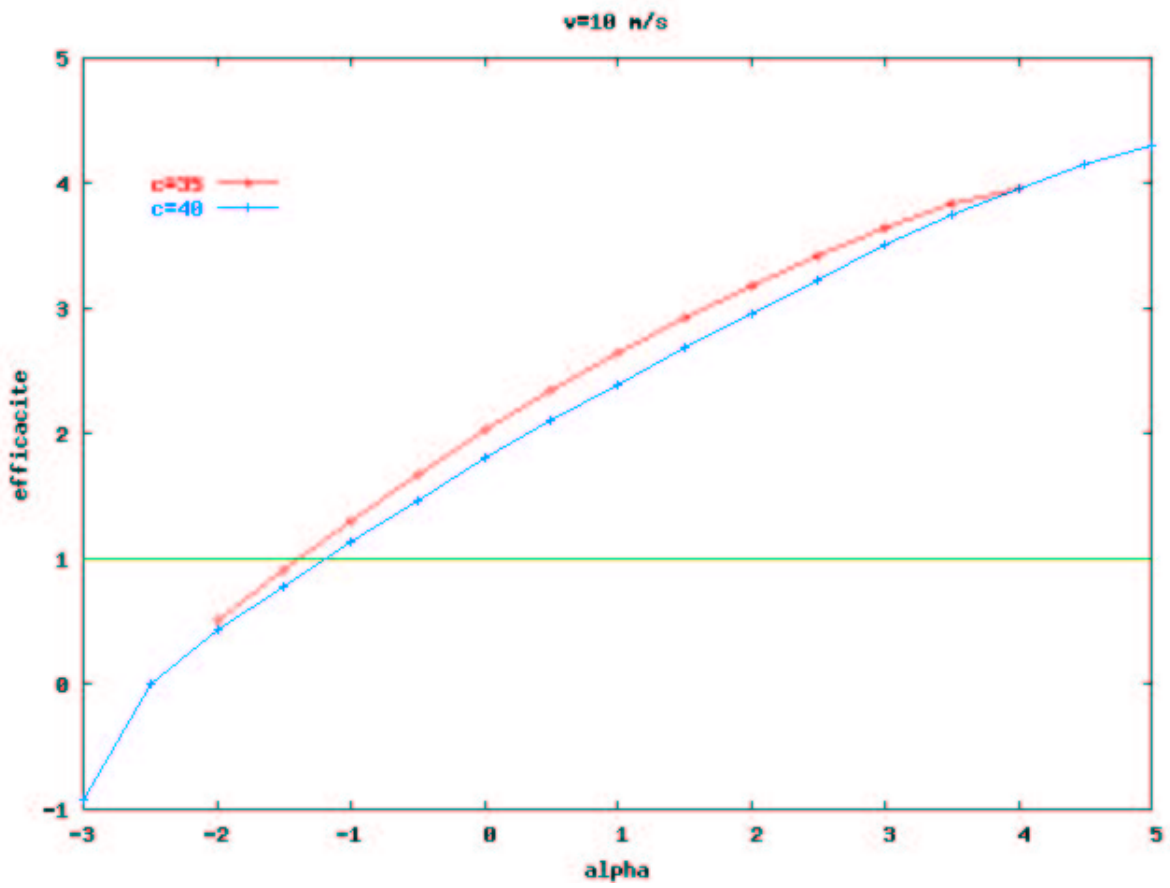


FIG. 16 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{\varepsilon}{c} = \frac{3}{40}$.









Le profil large $\frac{e}{c} = \frac{3}{40}$ semblerait plus efficace à faible vitesse mais moins efficace à vitesse plus élevée que le profil moins large $\frac{e}{c} = \frac{3}{35}$ bien que l'angle α peut contredire ceci.

5 profils "Bob White"

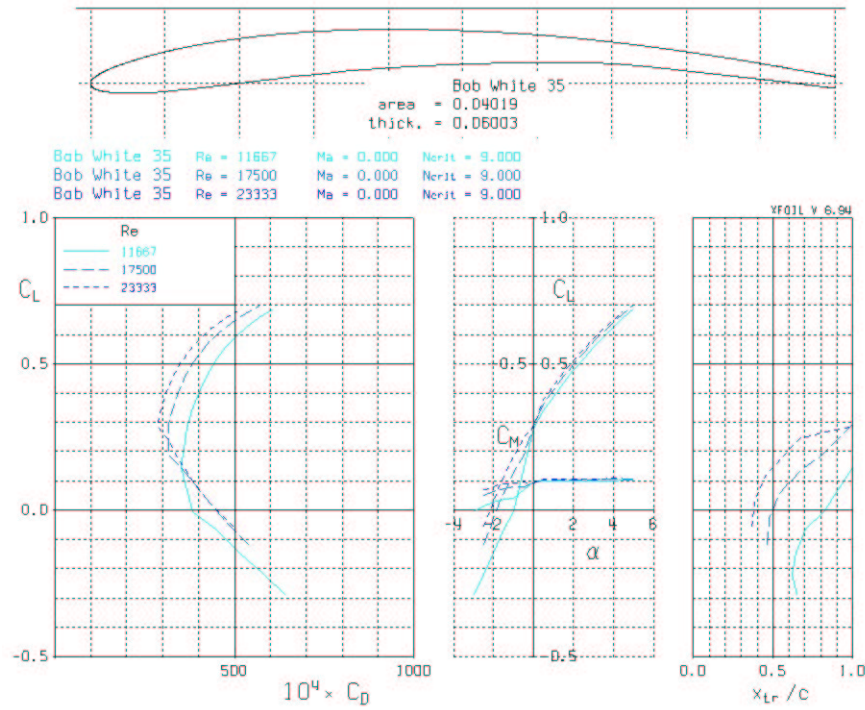


FIG. 17 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{\varepsilon}{c} = \frac{3}{35}$.

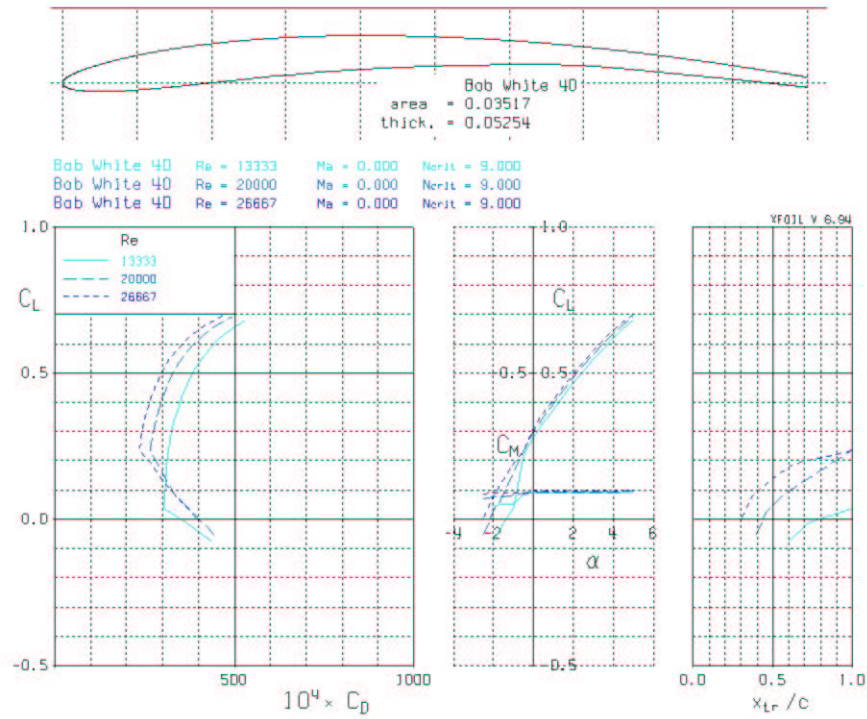


FIG. 18 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{\varepsilon}{c} = \frac{3}{40}$.

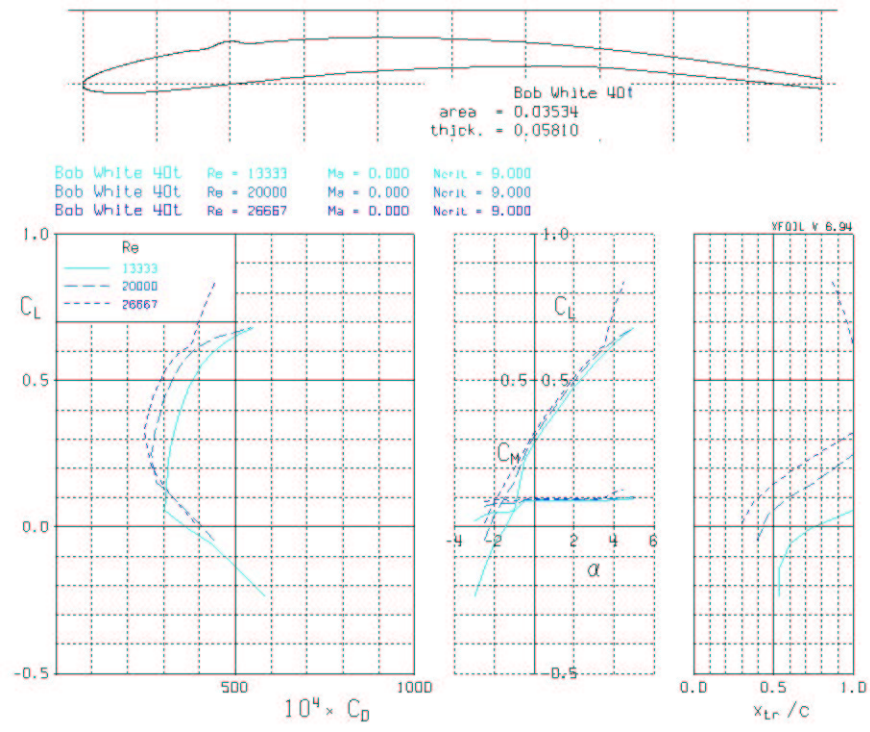


FIG. 19 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{40}$.

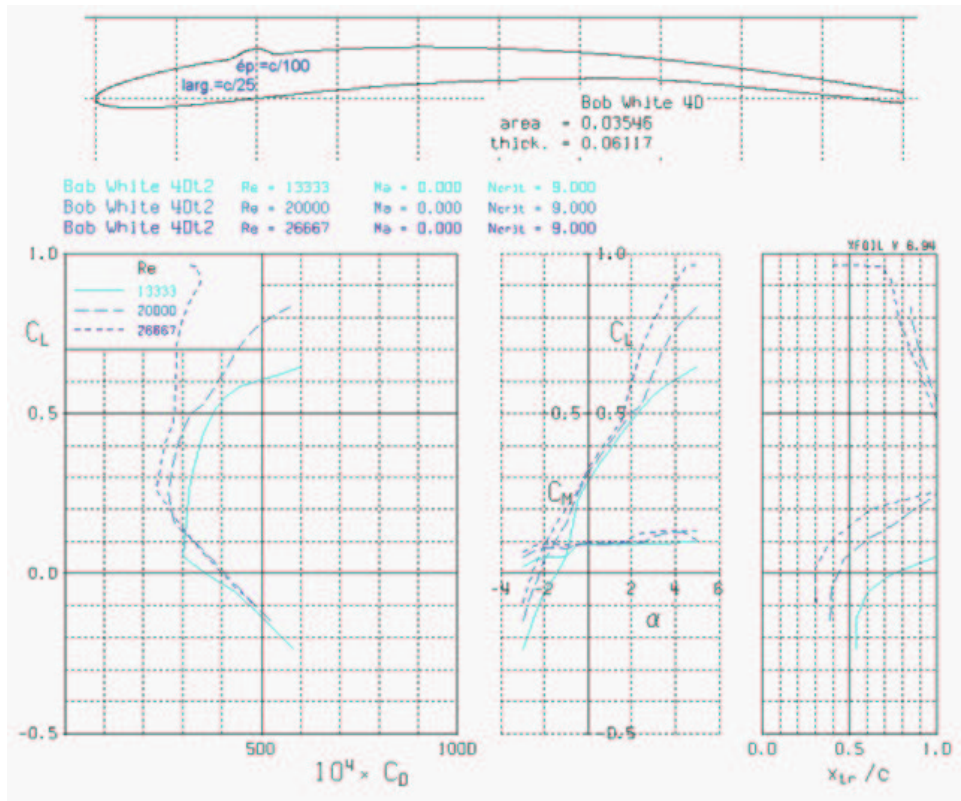
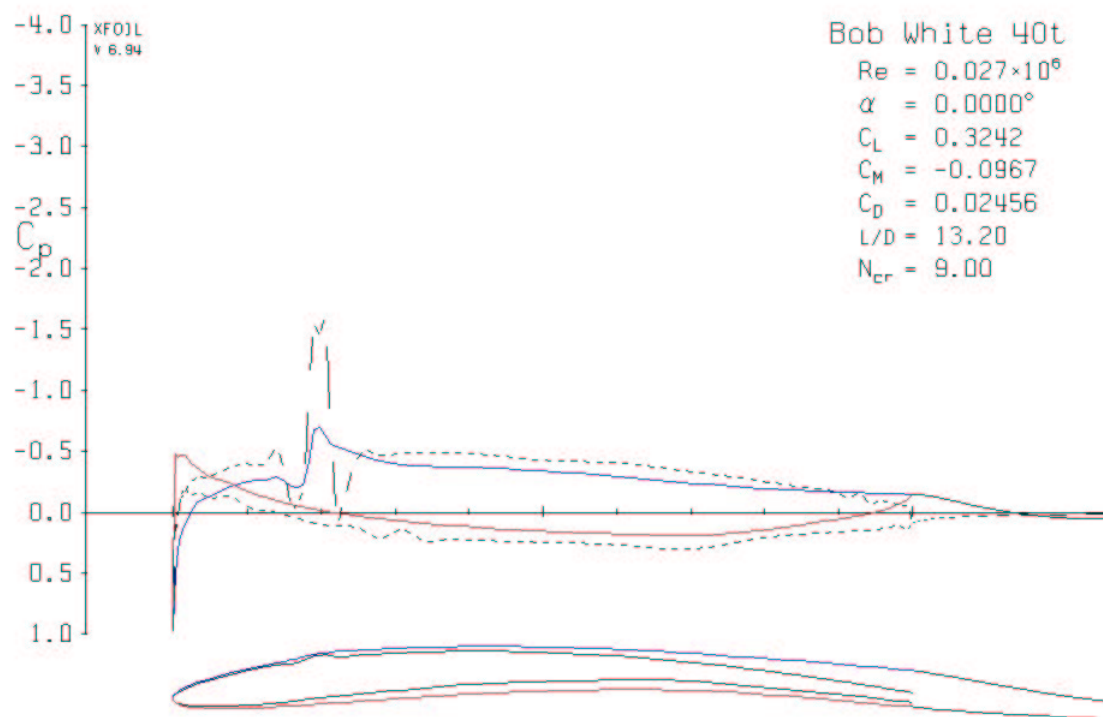
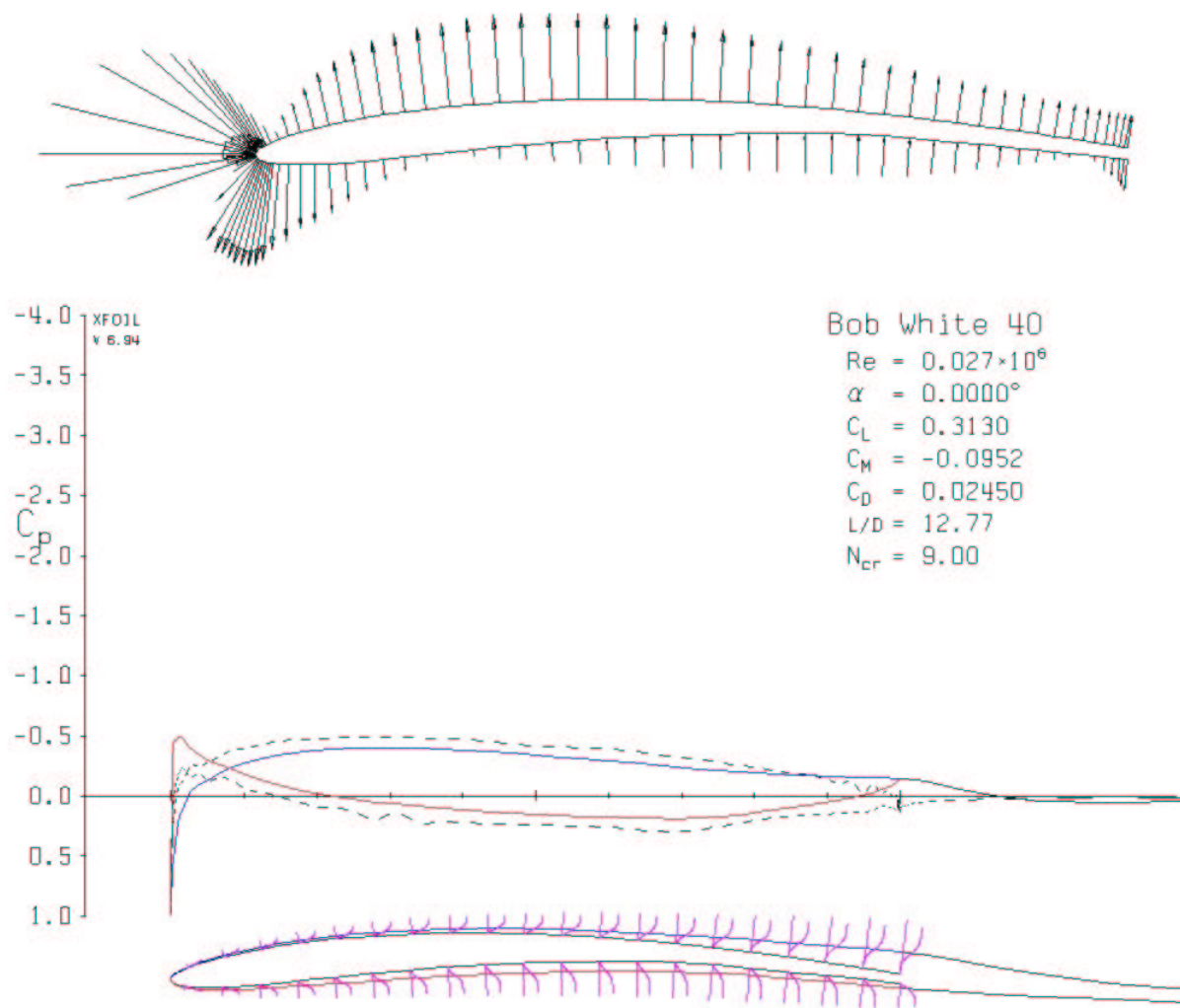
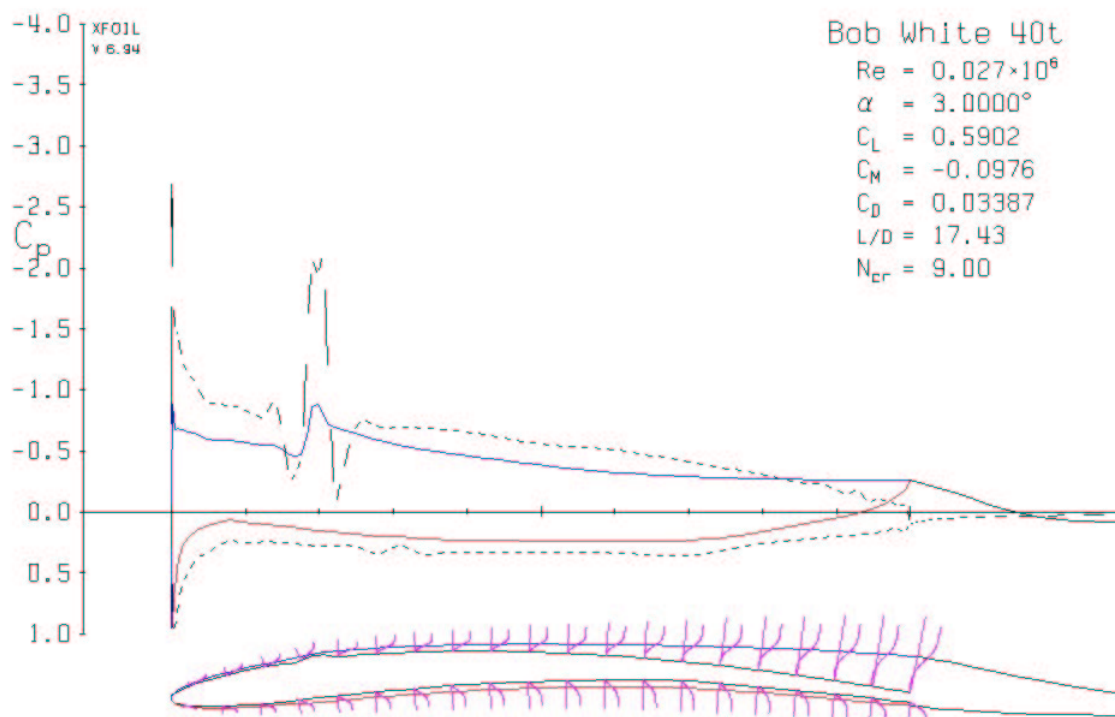
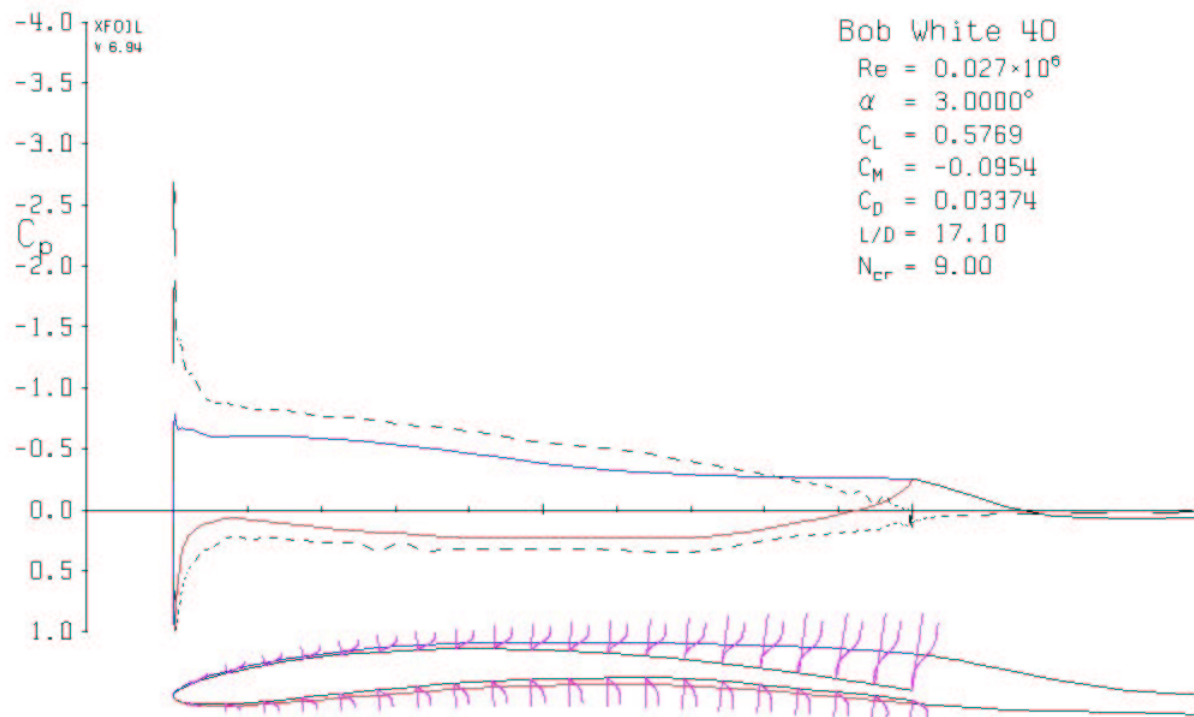
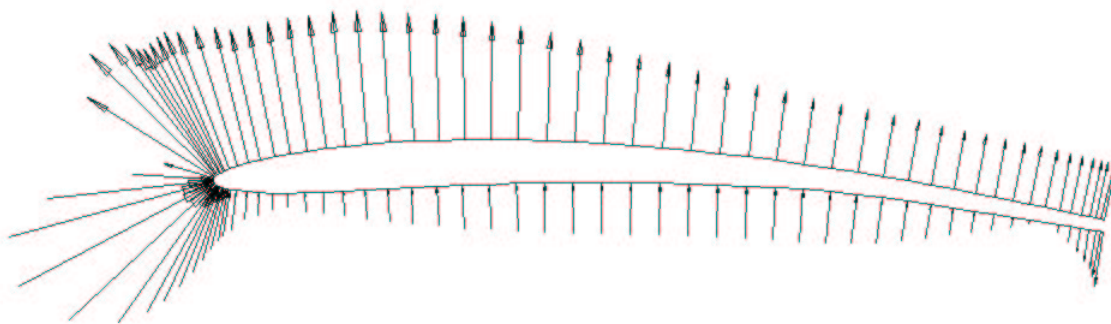
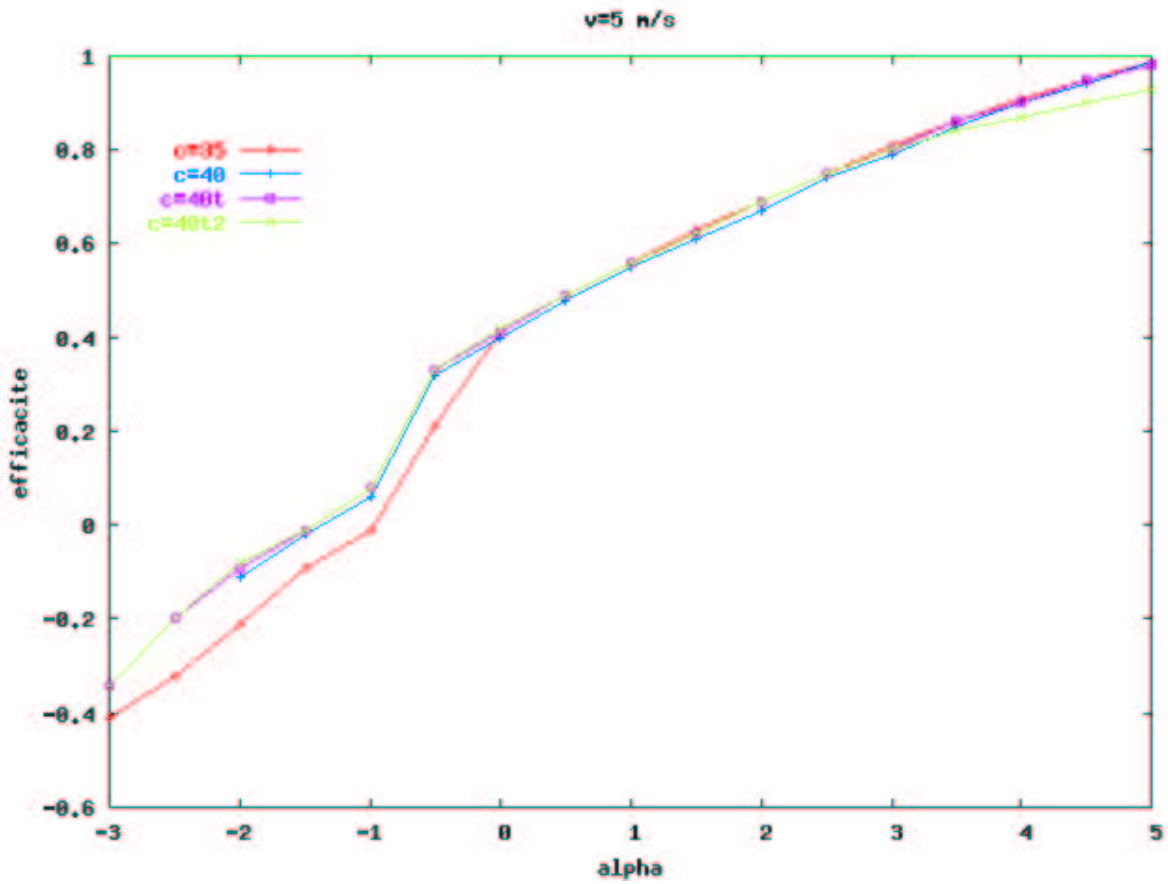
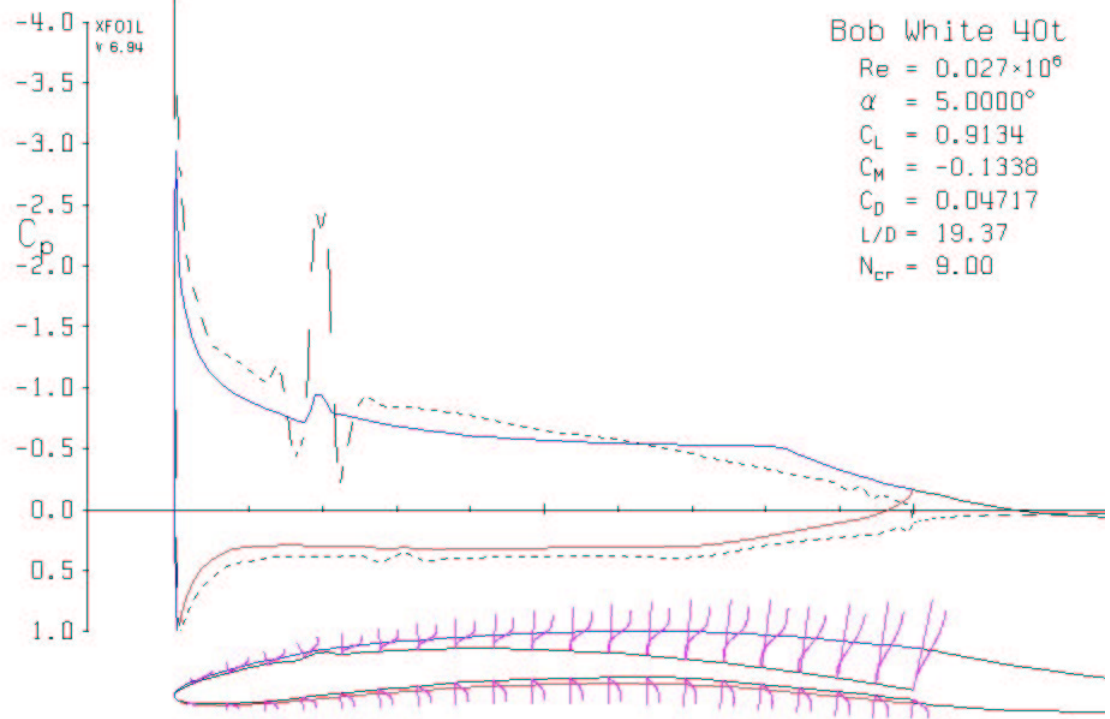
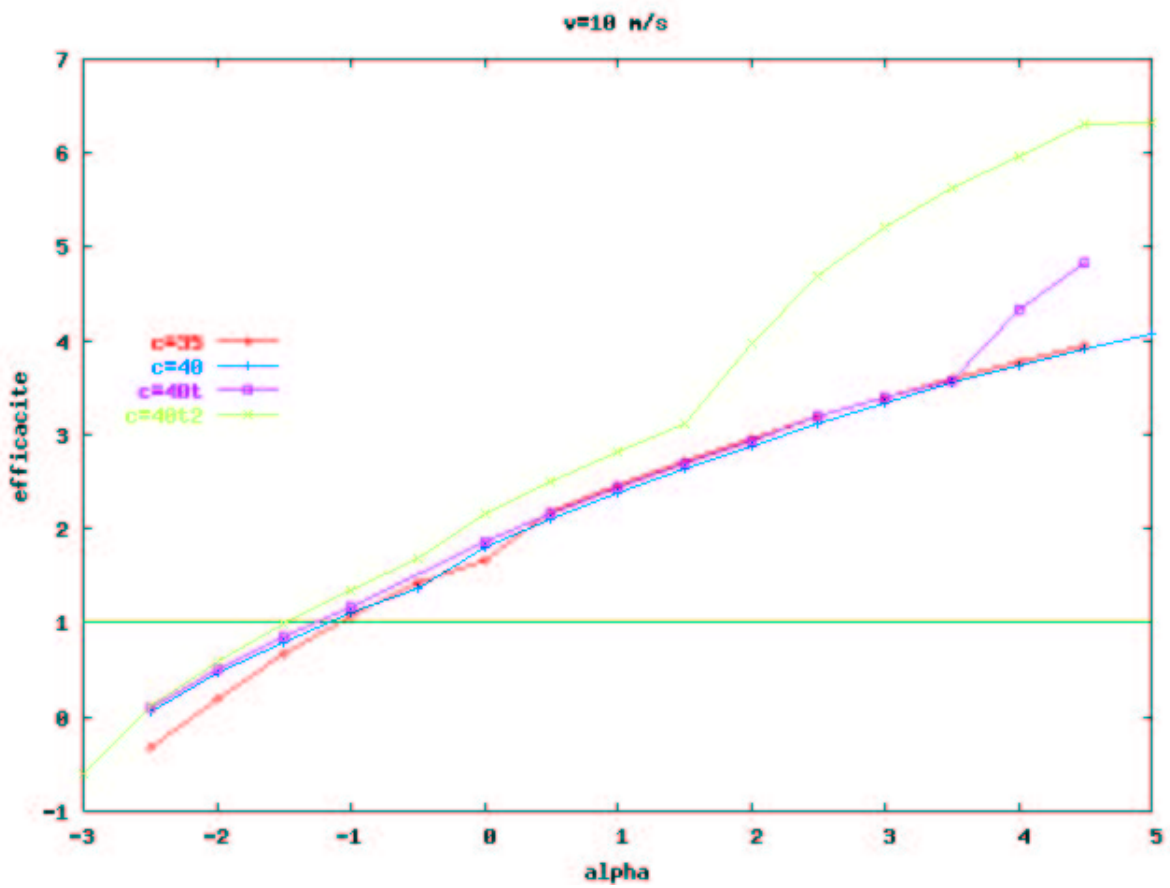
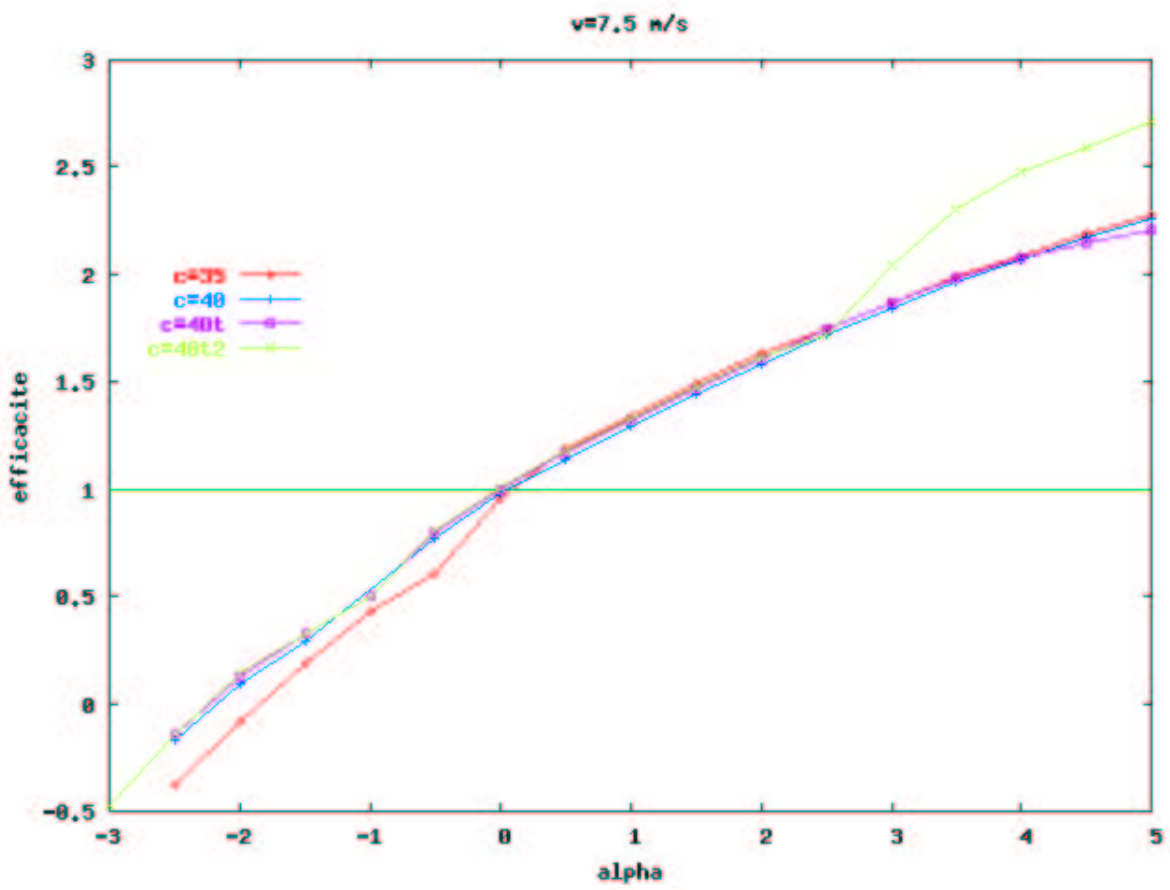


FIG. 20 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{40}$.









Ces 4 profils "Bob White" semblent quasiment aussi efficaces bien que le profil avec gros turbulateur "BobWhite40t2" est plus efficace pour les grandes vitesses surtout à partir du moment où la couche

limite recolle à l'extrados : on remarque en effet les sauts de $C_z(\alpha)$ et de $\epsilon(\alpha)$ aux vitesses élevées qui correspondent à ce recollement.

6 profils "Espada"

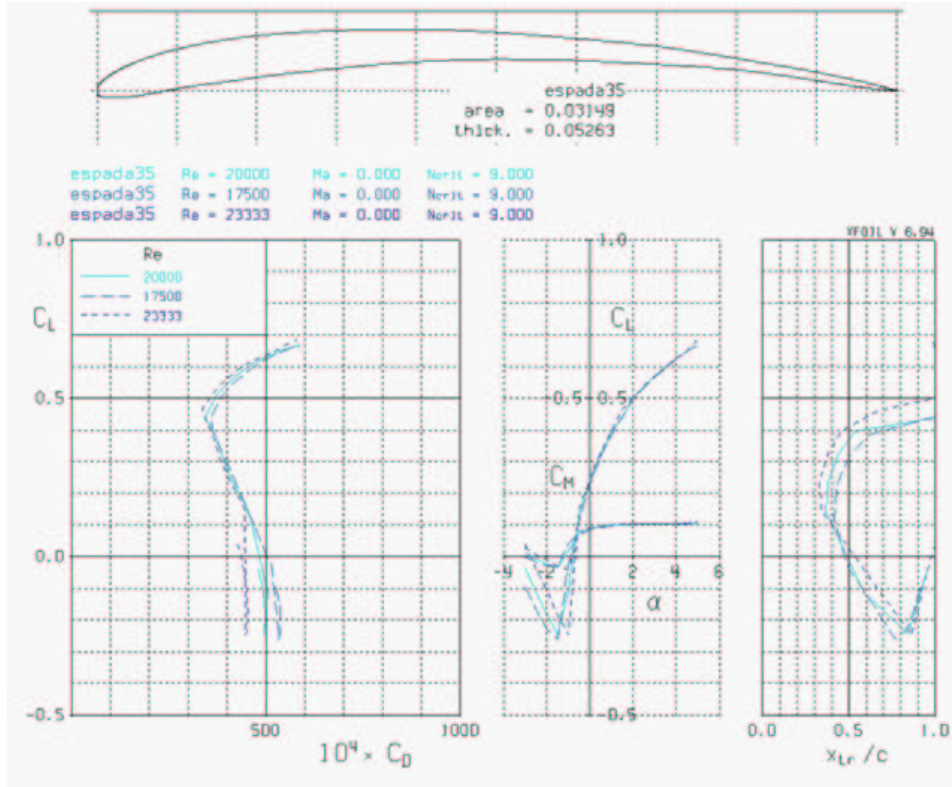


FIG. 21 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{35}$.

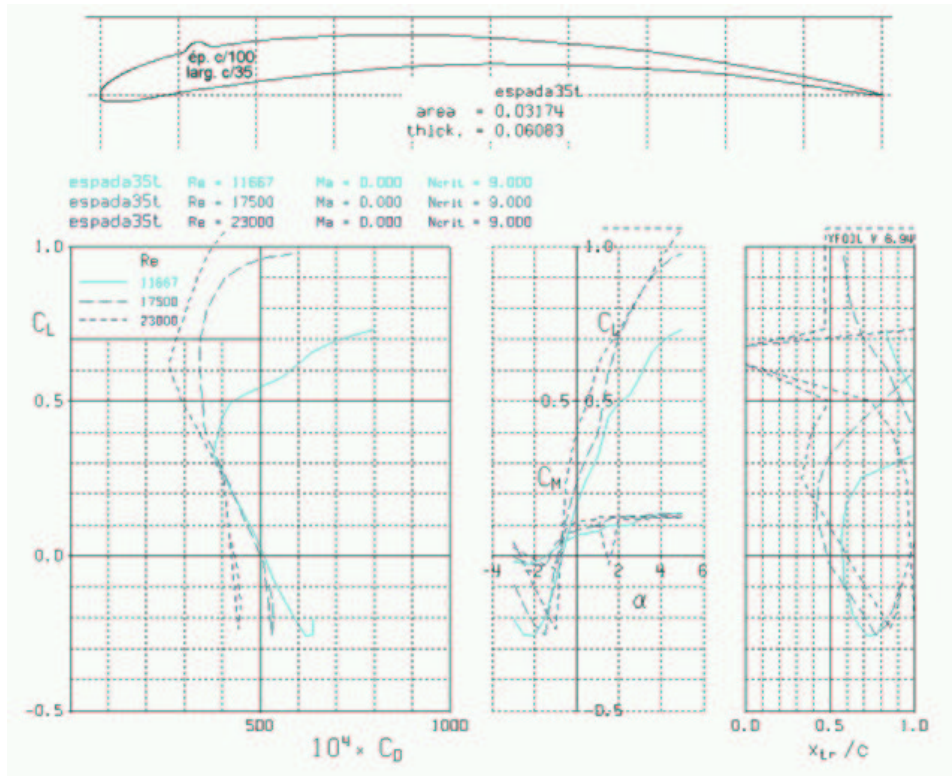


FIG. 22 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{35}$.

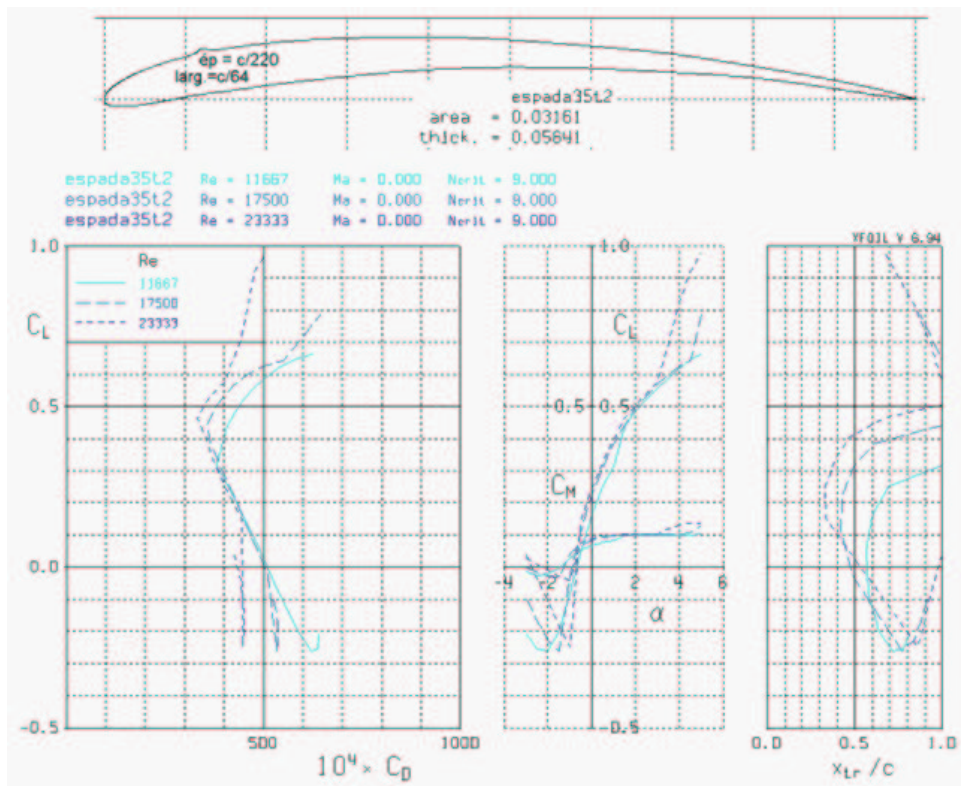


FIG. 23 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{35}$.

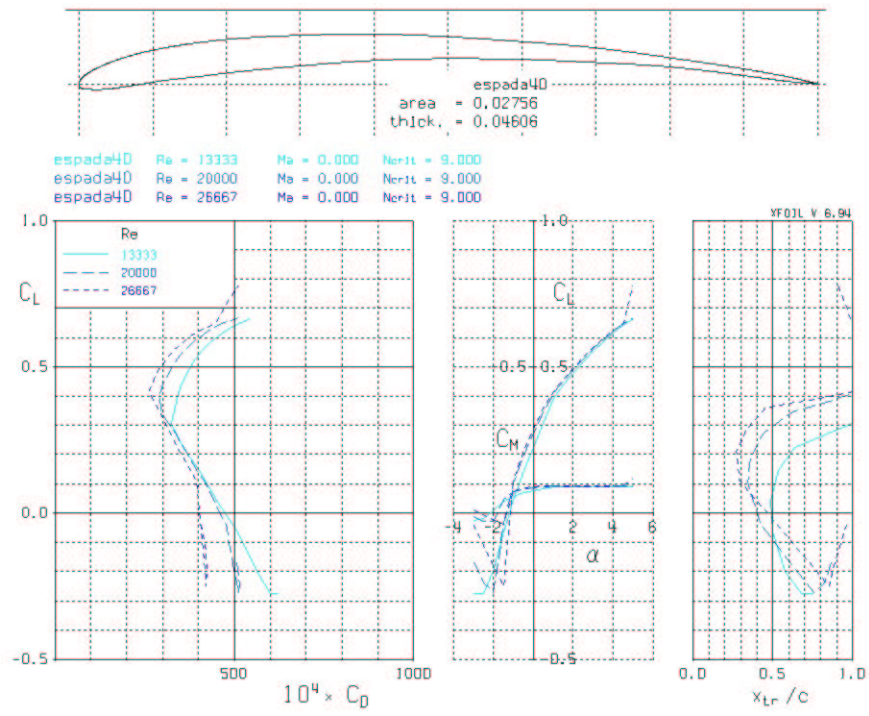


FIG. 24 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{40}$.

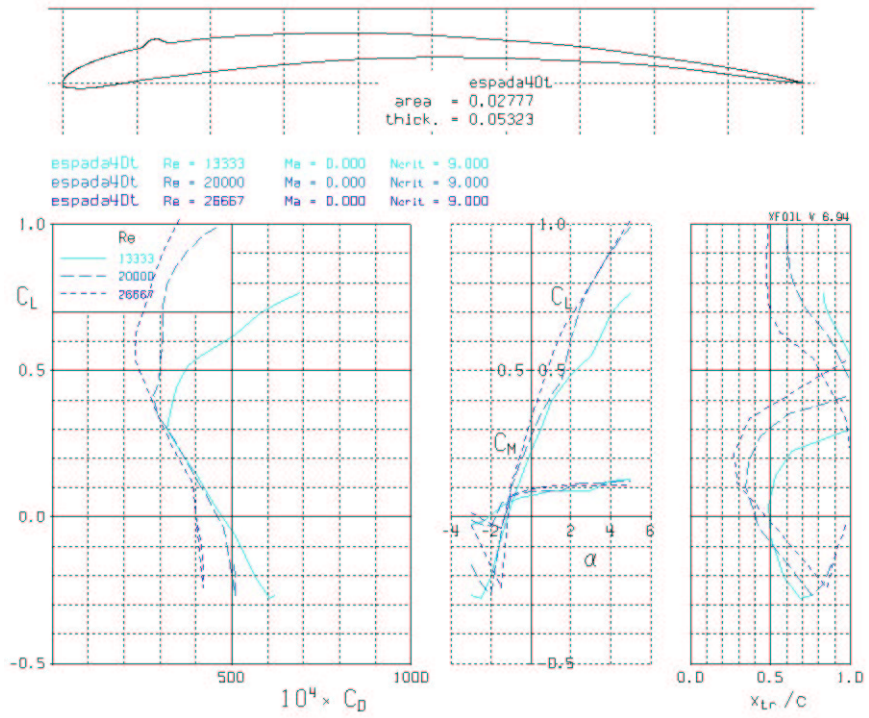
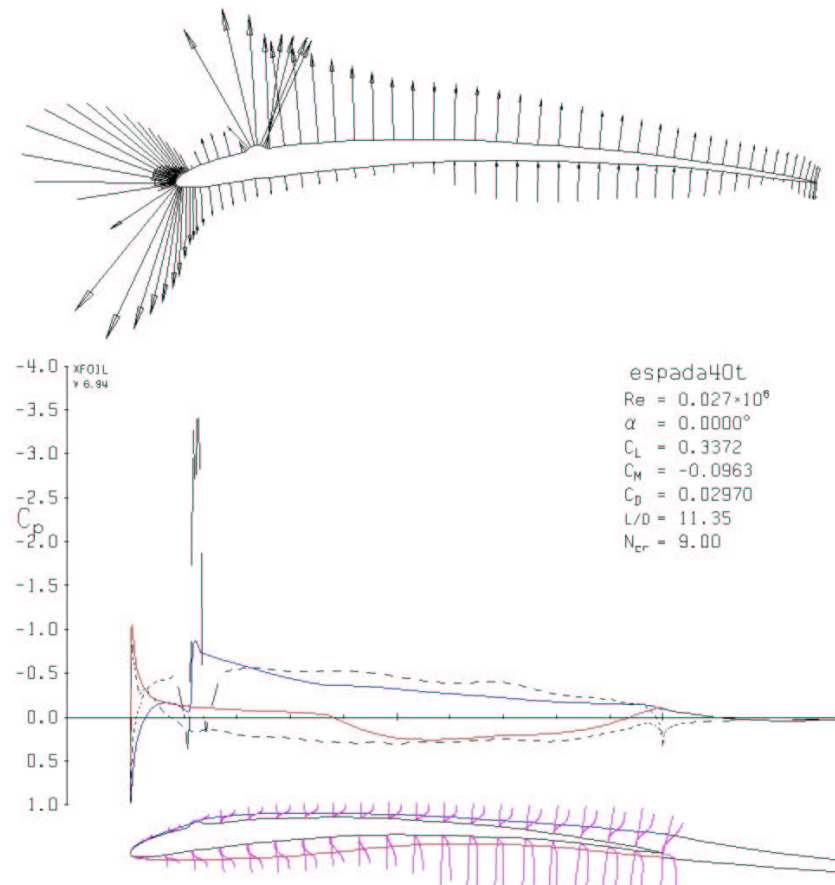
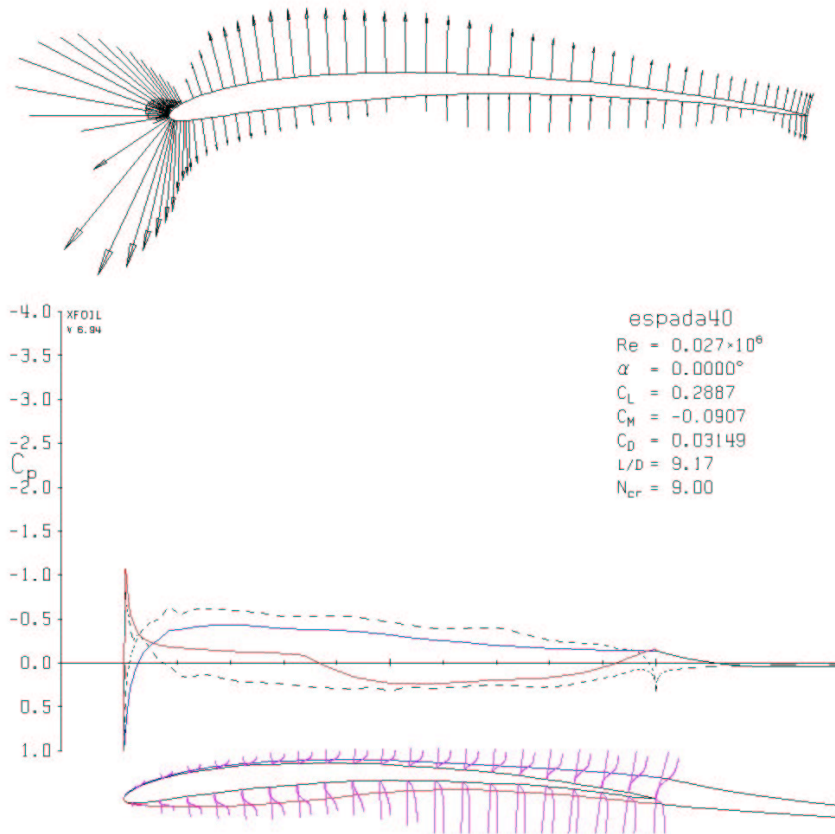
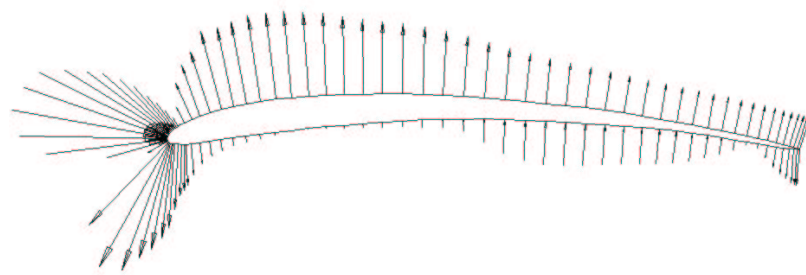


FIG. 25 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{40}$.

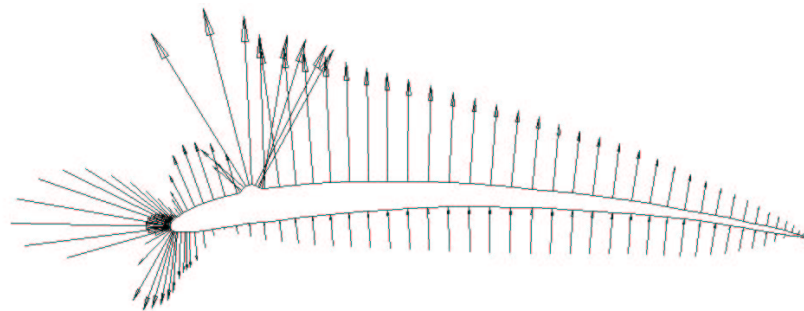
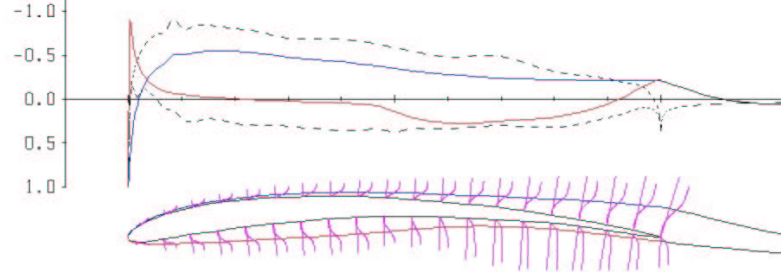




XF01L
y 6.94

-4.0
-3.5
-3.0
-2.5
-2.0
 C_p
-1.5
-1.0
-0.5
0.0
0.5
1.0

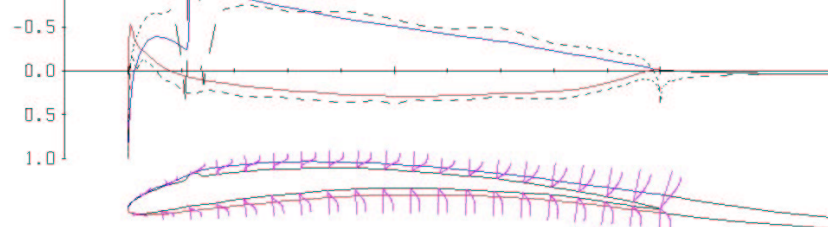
espada35
 $Re = 0.023 \times 10^6$
 $\alpha = 1.0000^\circ$
 $C_L = 0.3984$
 $C_M = -0.1006$
 $C_D = 0.03580$
 $L/D = 11.13$
 $N_{cr} = 9.00$

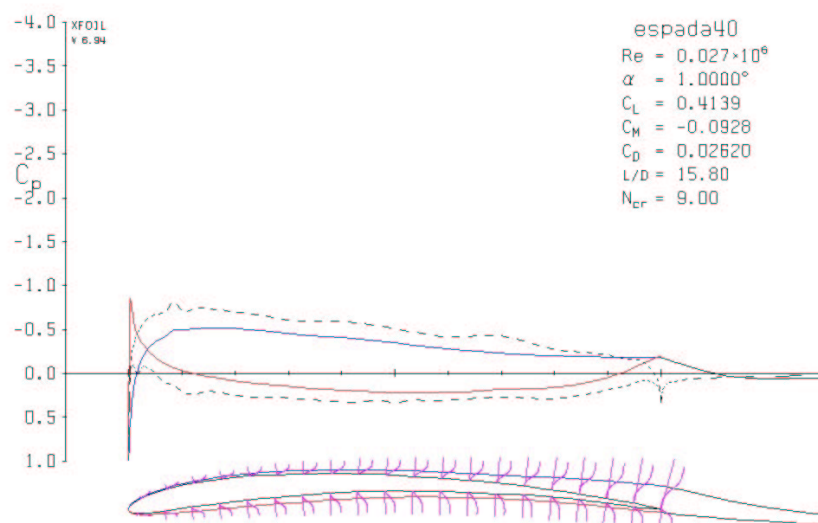
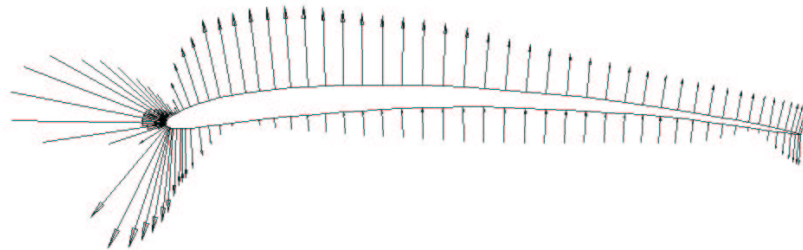
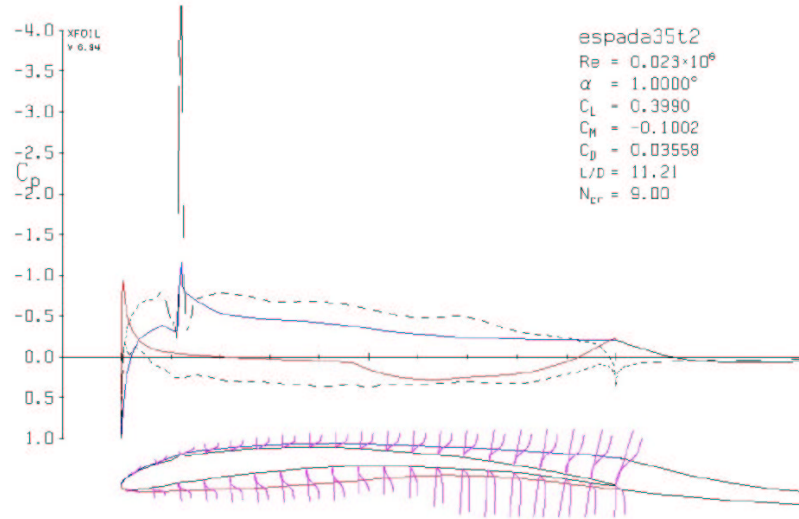
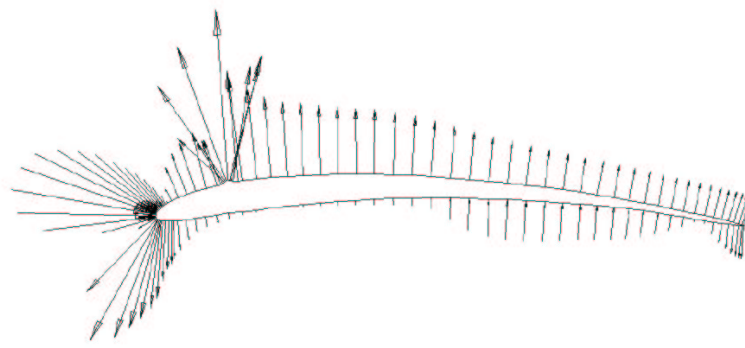


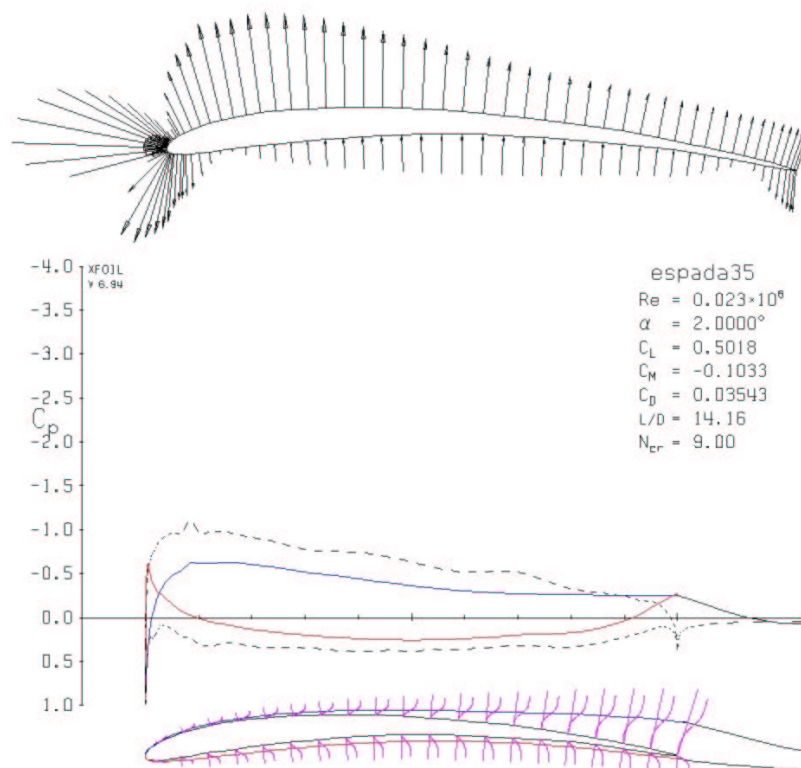
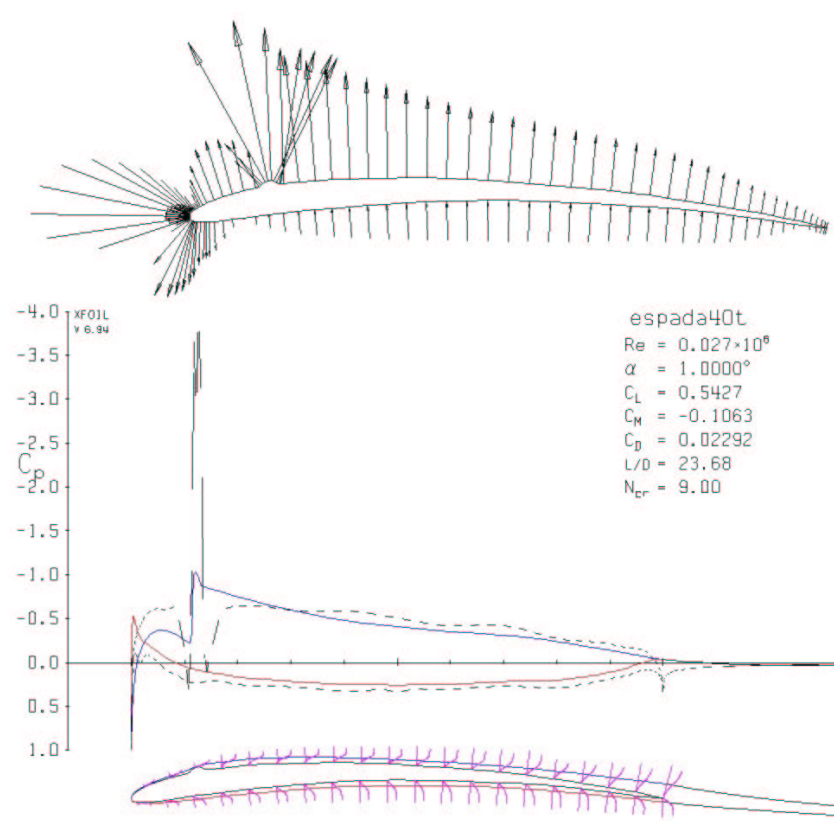
XF01L
y 6.94

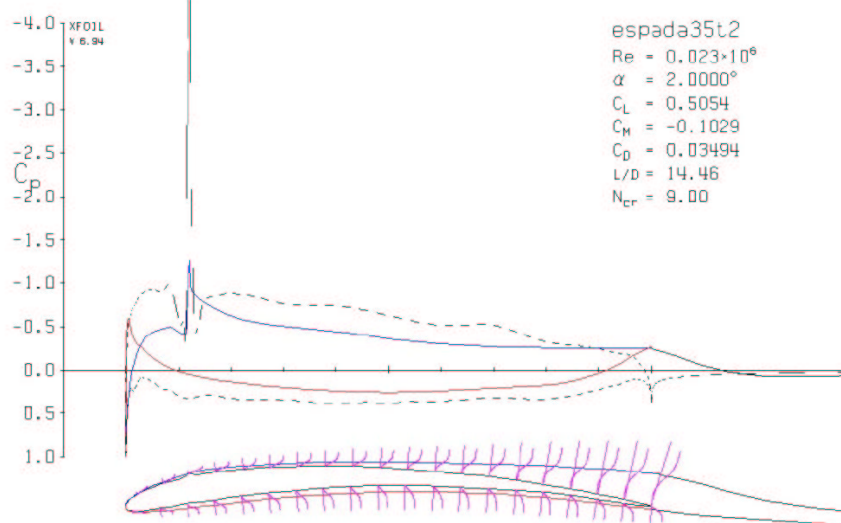
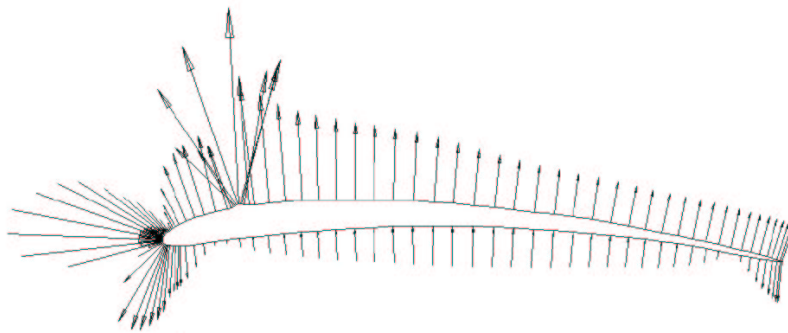
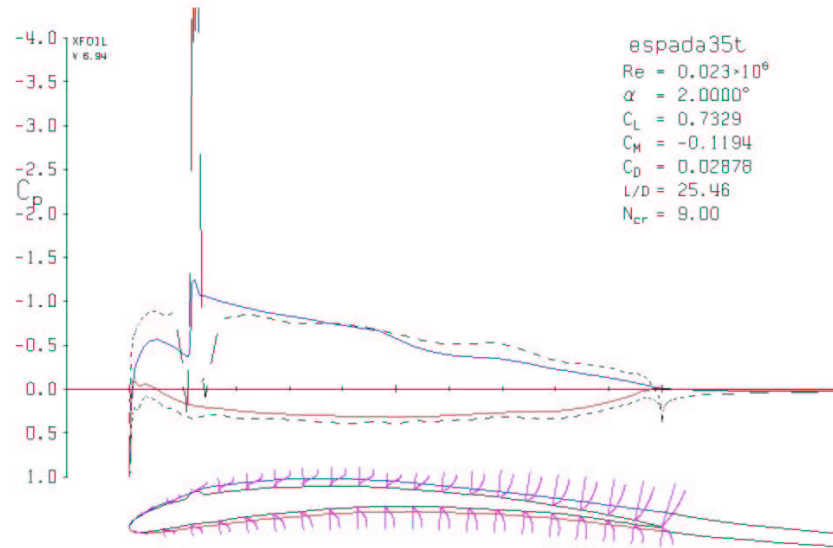
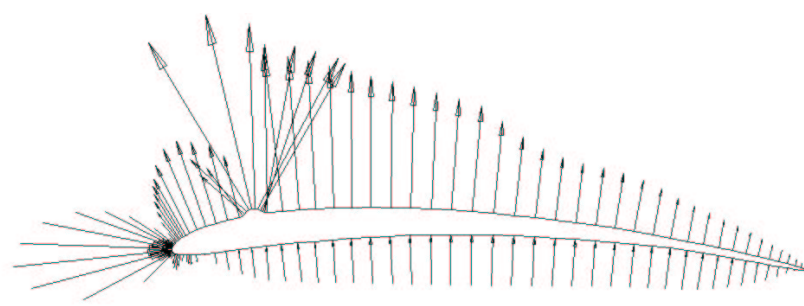
-4.0
-3.5
-3.0
-2.5
-2.0
 C_p
-1.5
-1.0
-0.5
0.0
0.5
1.0

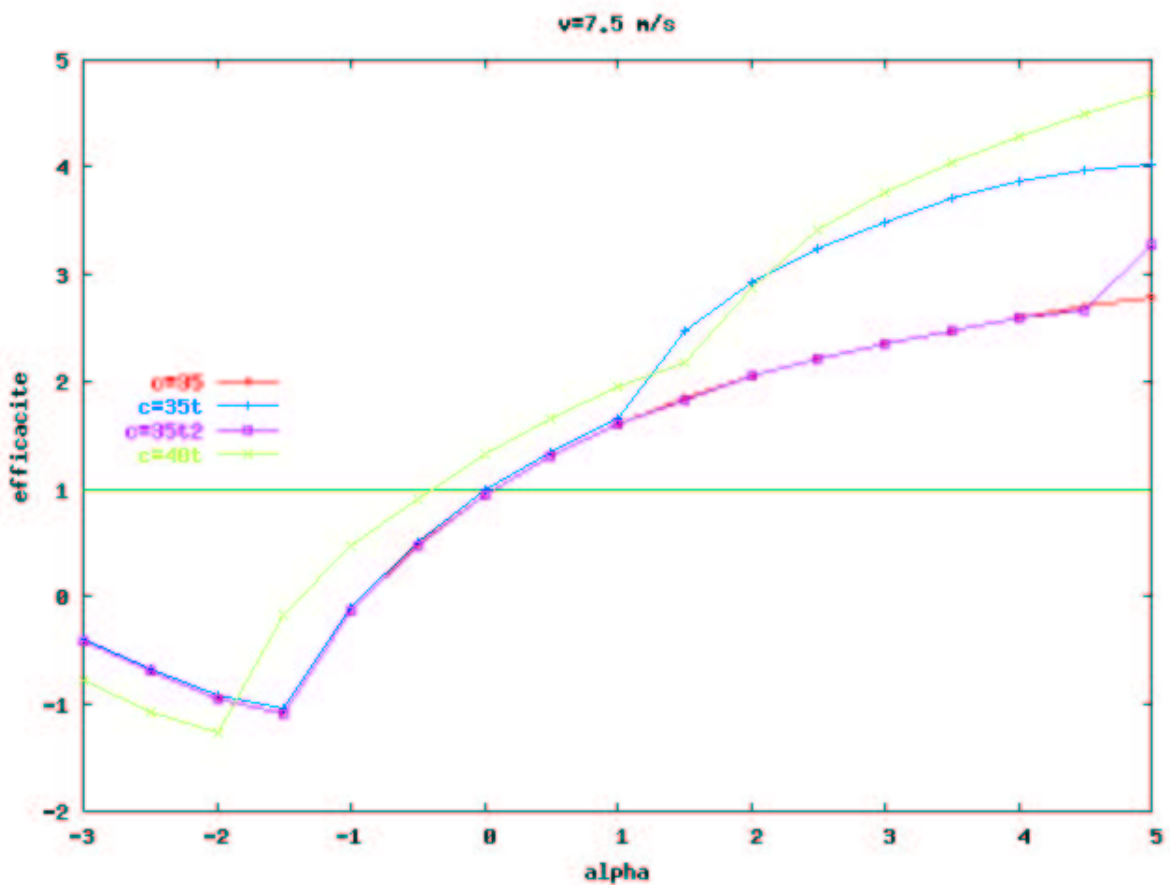
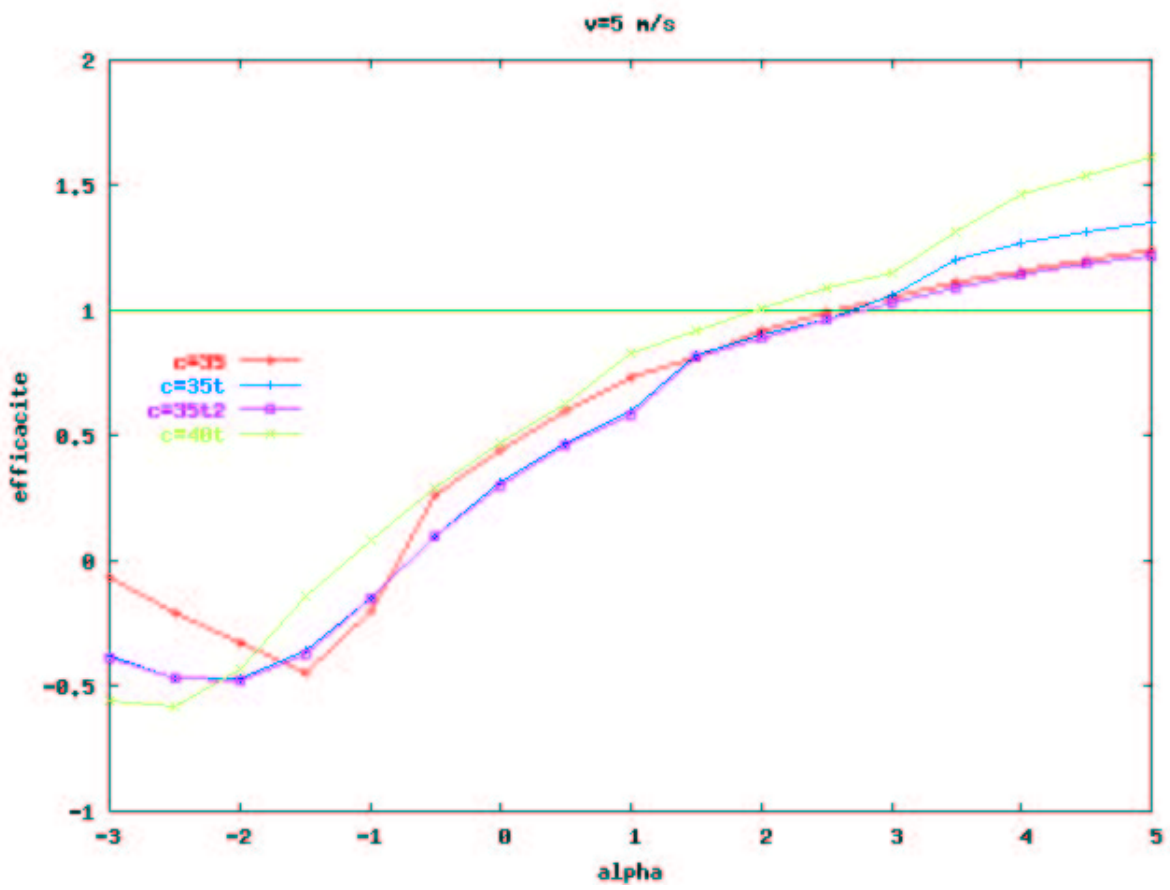
espada35t
 $Re = 0.023 \times 10^6$
 $\alpha = 1.0000^\circ$
 $C_L = 0.6194$
 $C_M = -0.1204$
 $C_D = 0.02574$
 $L/D = 24.06$
 $N_{cr} = 9.00$

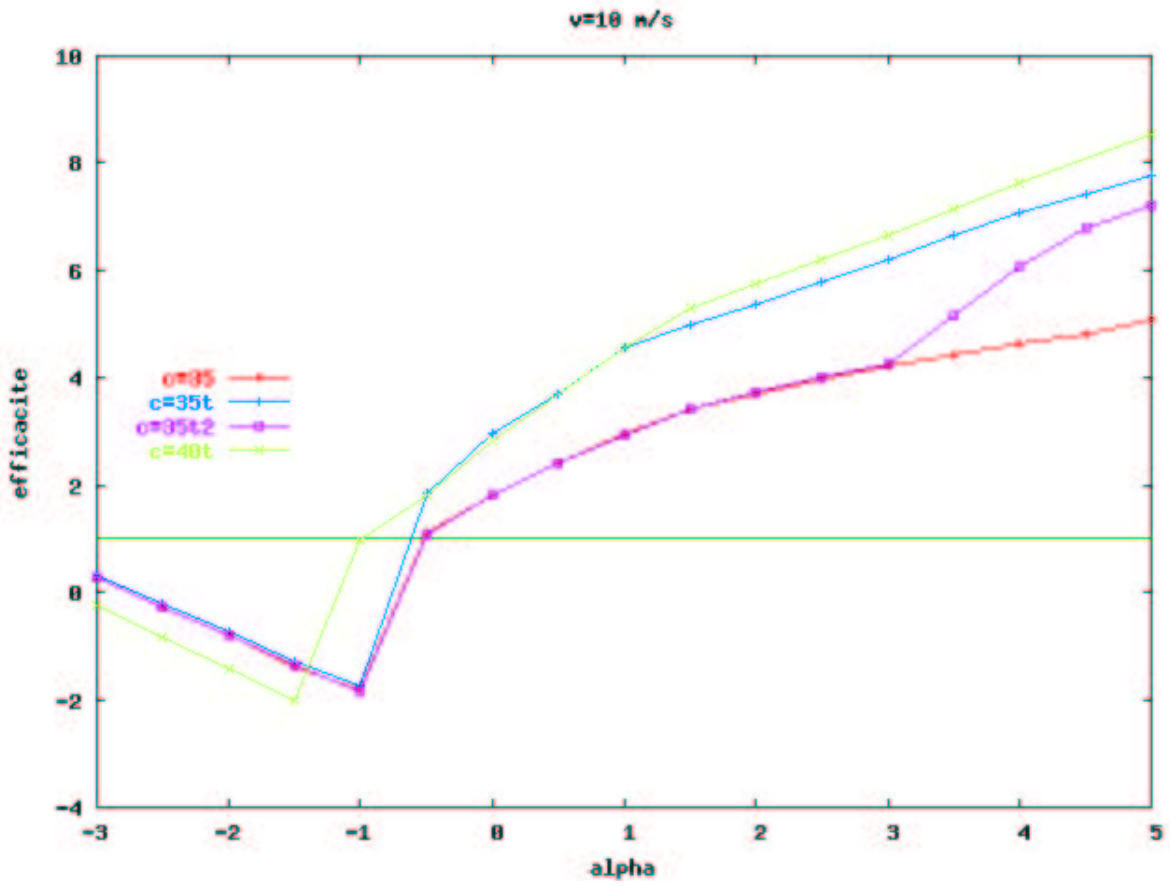












Comme le profil "Bob White", ce profil "Espada" est plus efficace avec un gros turbulateur (35t) qu'avec un petit (35t2). Le recollement de la couche limite sur l'extrados s'effectuant pour un angle d'incidence α plus faible avec le gros turbulateur ($\alpha = -0.5^\circ$) qu'avec le petit ($\alpha = 3^\circ$).

Le profil de grande largeur est guère plus efficace que celui de petite largeur.

7 profils "Benedek"

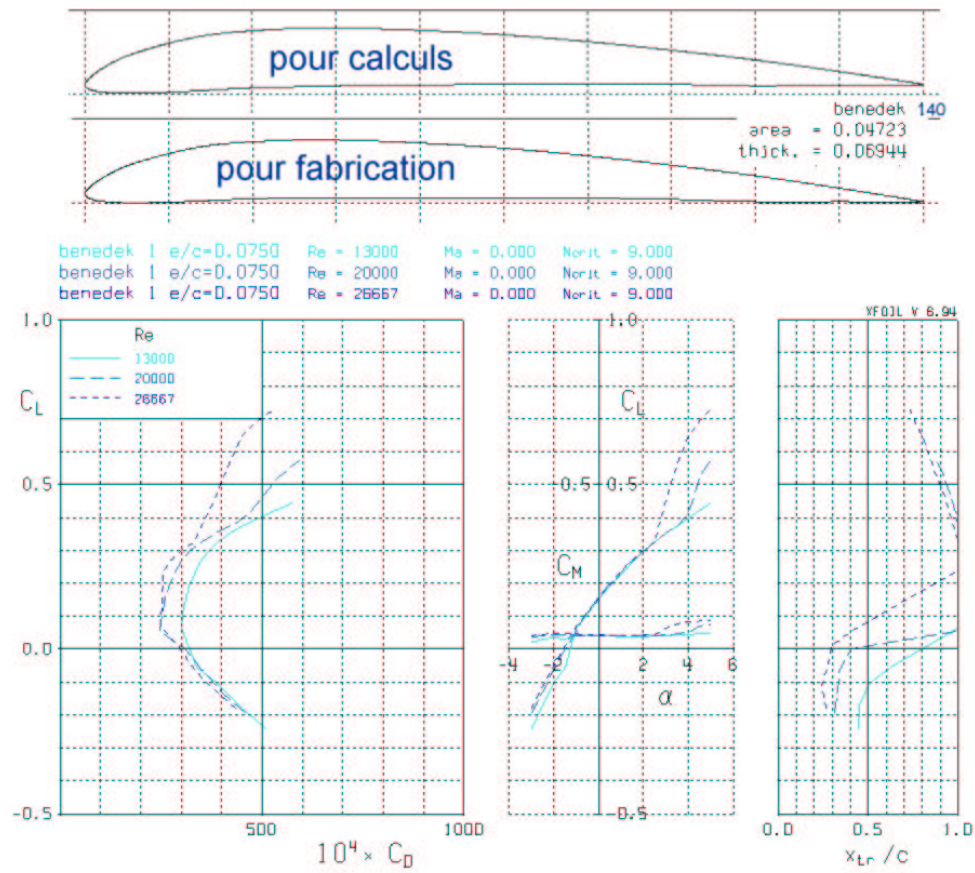
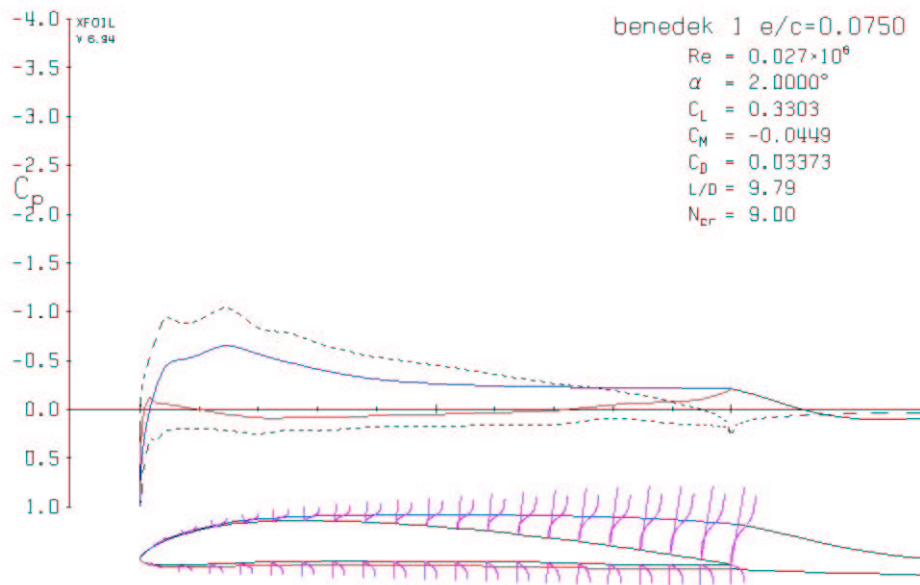
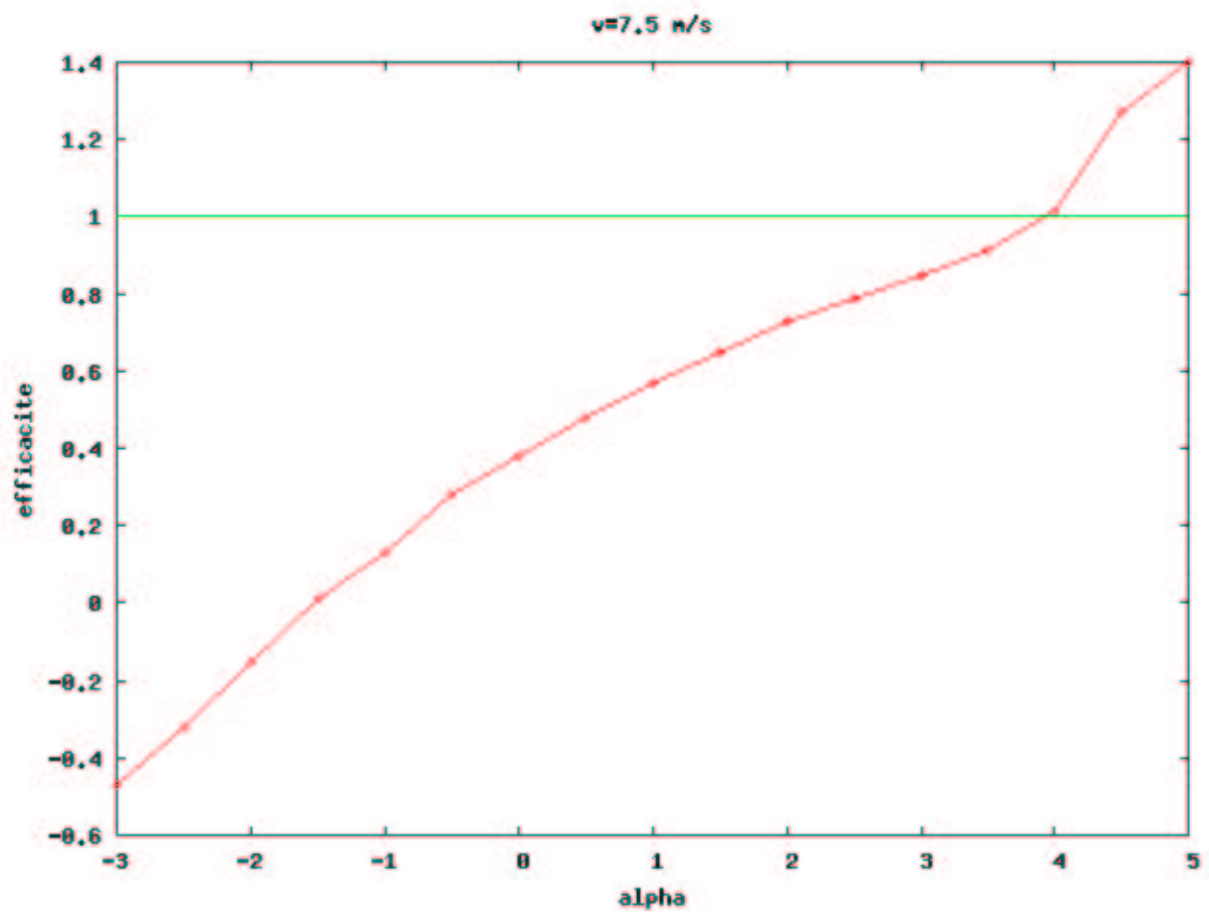
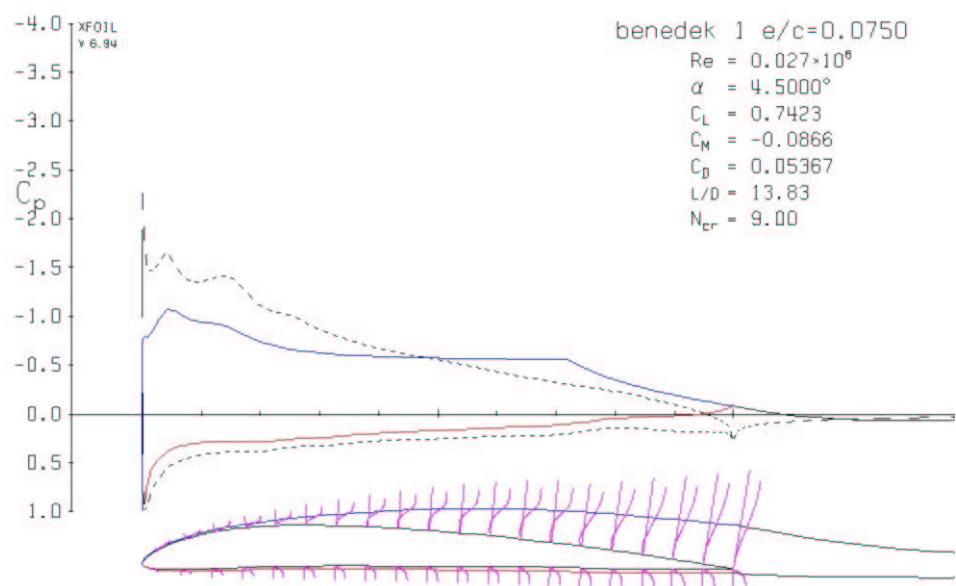
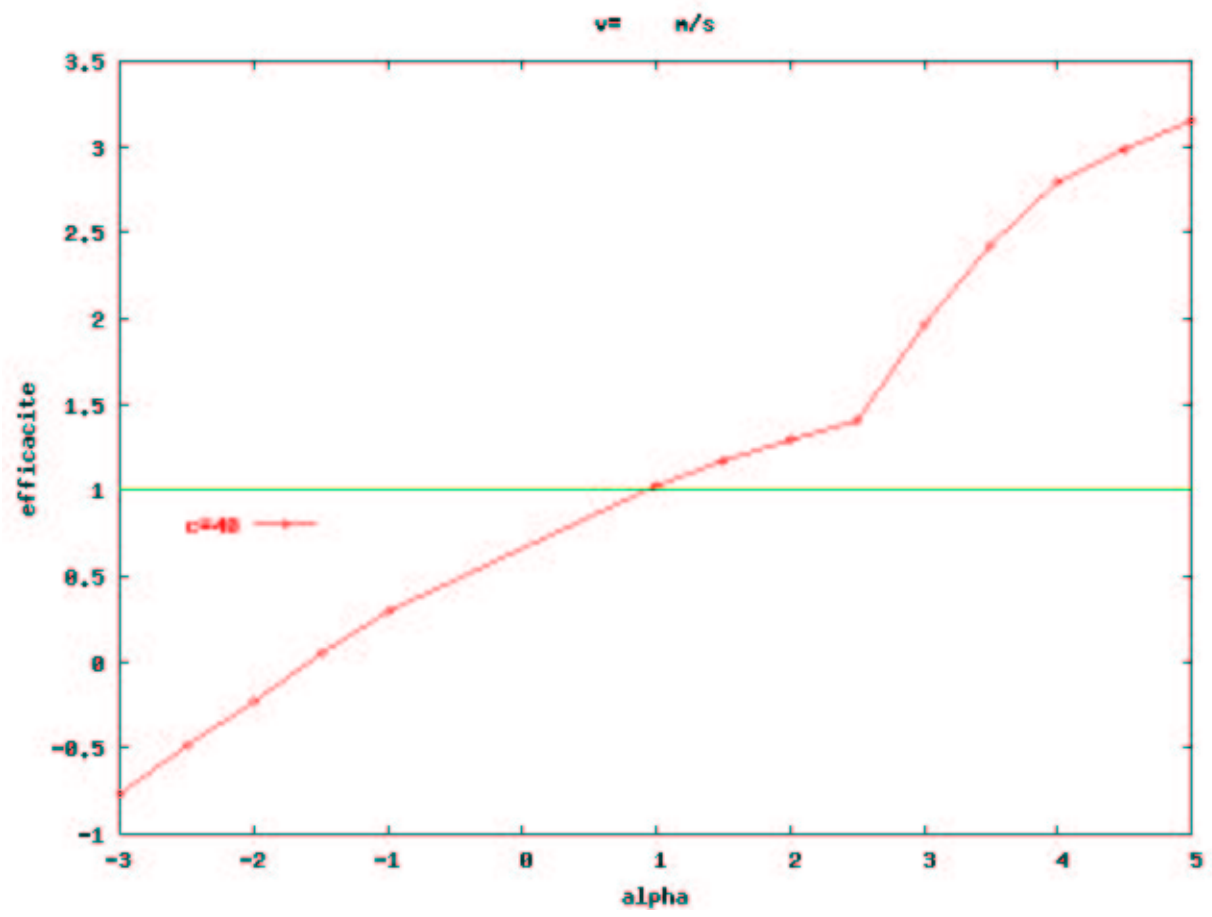


FIG. 26 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{40}$.







8 profils "Espa"

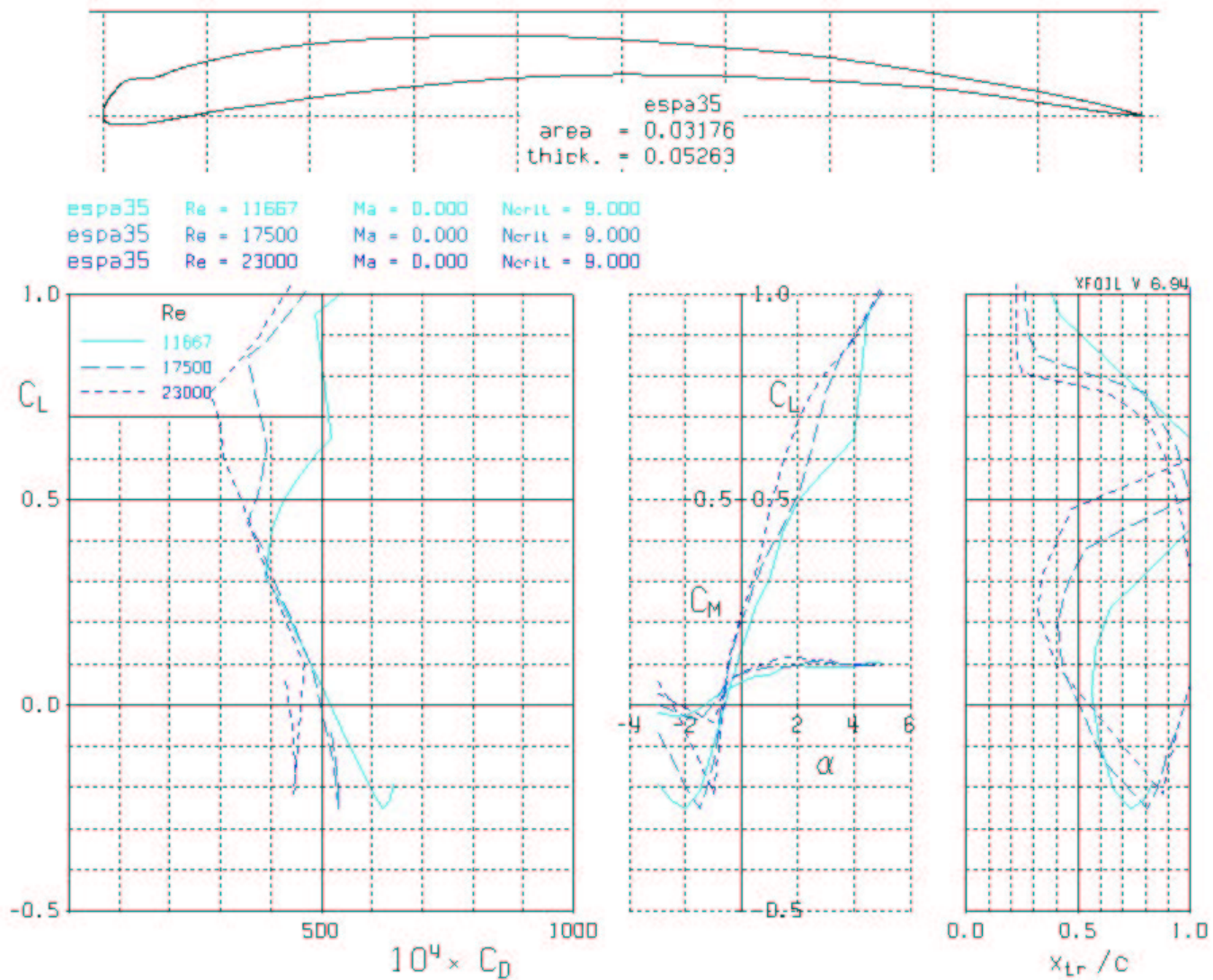
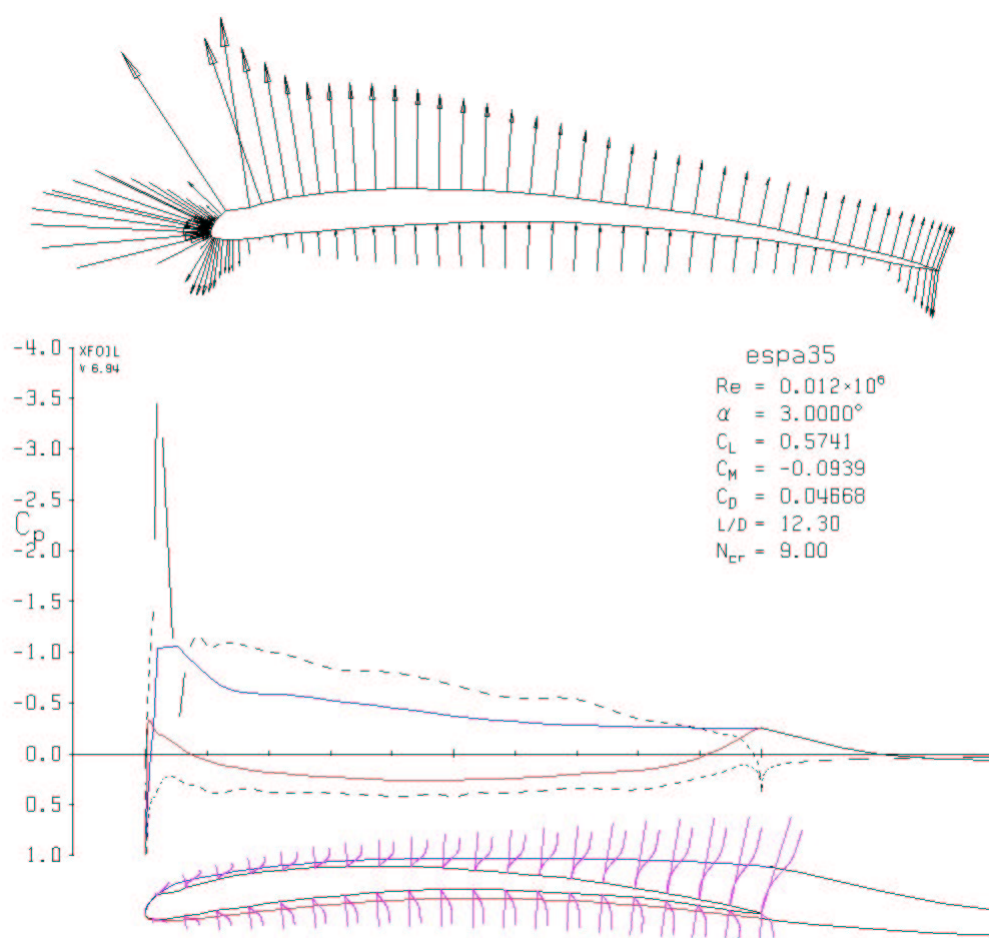
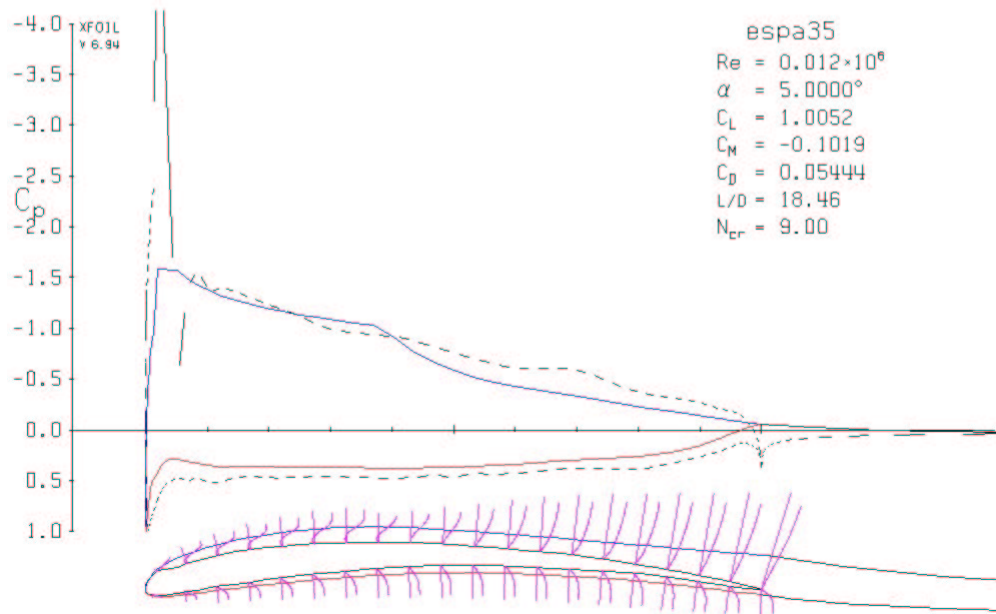
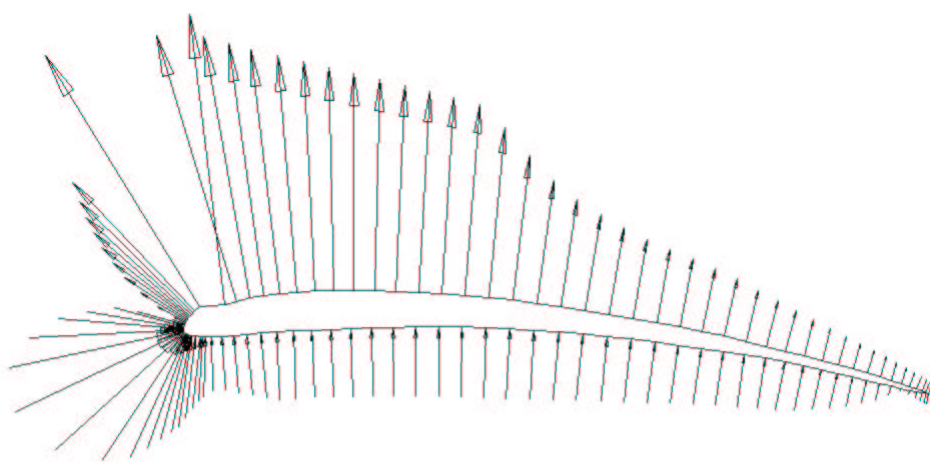


FIG. 27 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{35}$.





9 profils "Espo"

Ce profil a le même estrados que le profil Espo mais un intrados deux fois moins creusé. Si les coefficients aérodynamiques n'ont pas trop évolués, le poids du profil a augmenté de 38 % (S^* est passé de 0.031 à 0.043!).

De ce fait l'efficacité de ce profil "Espo" est moins bonne que celle du profil "Espa" bien qu'une incidence négative peut contredire ceci.

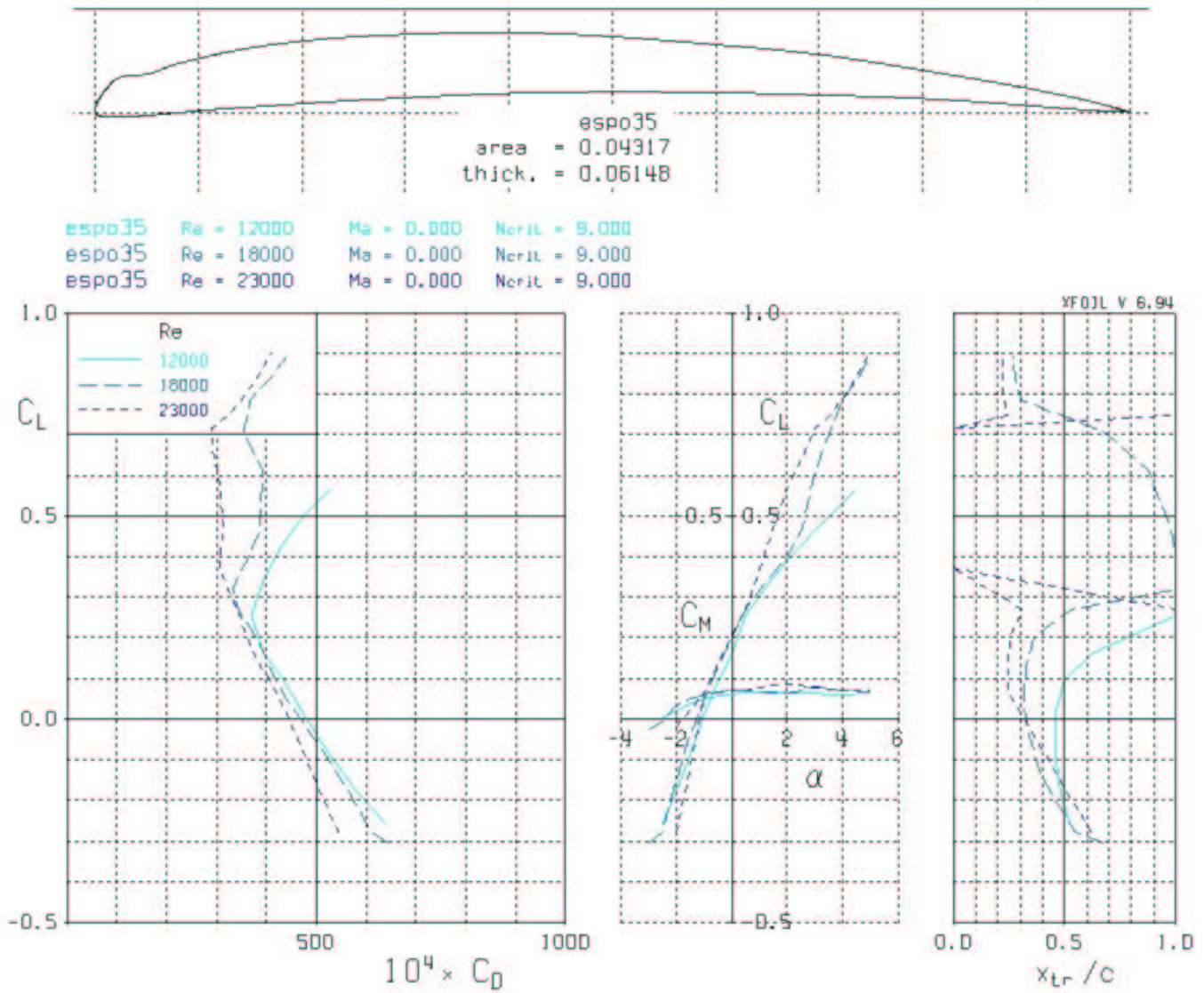
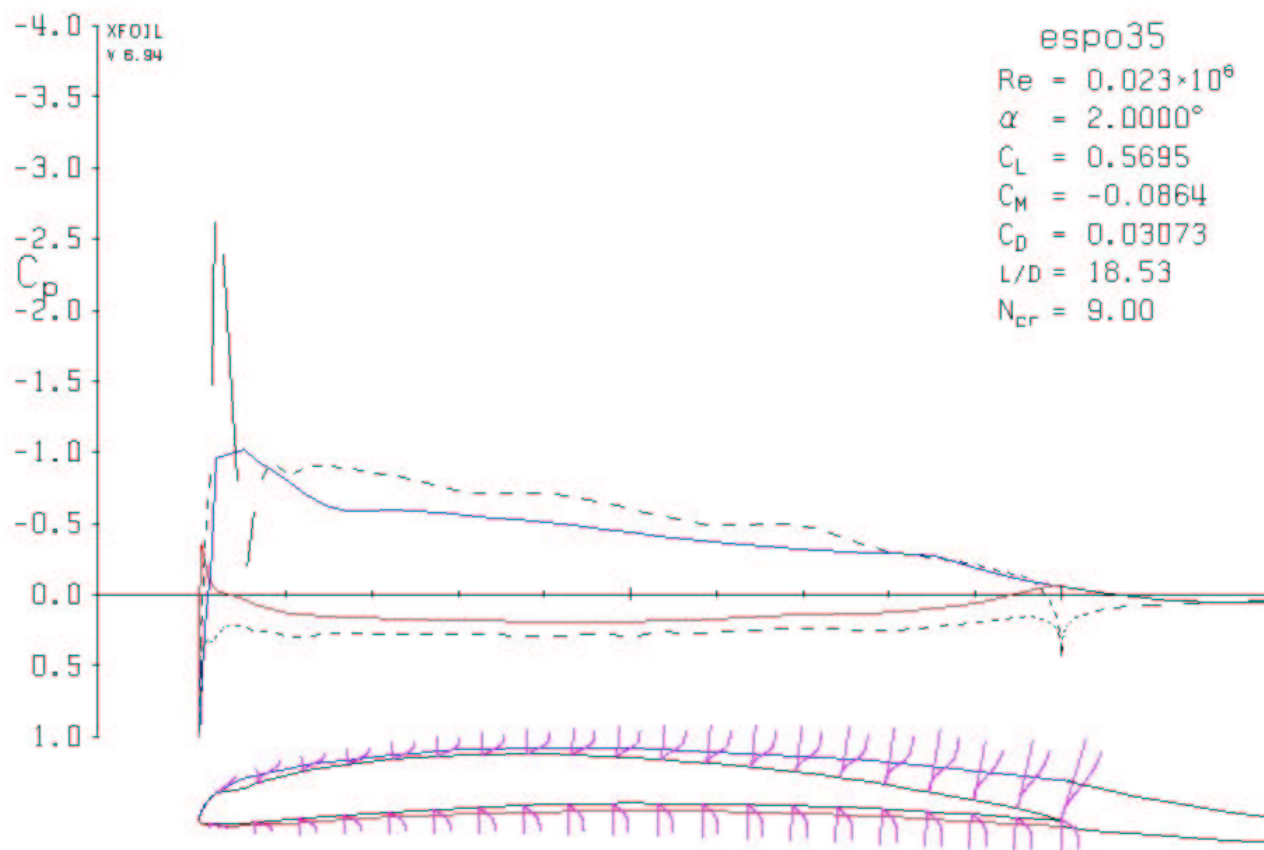
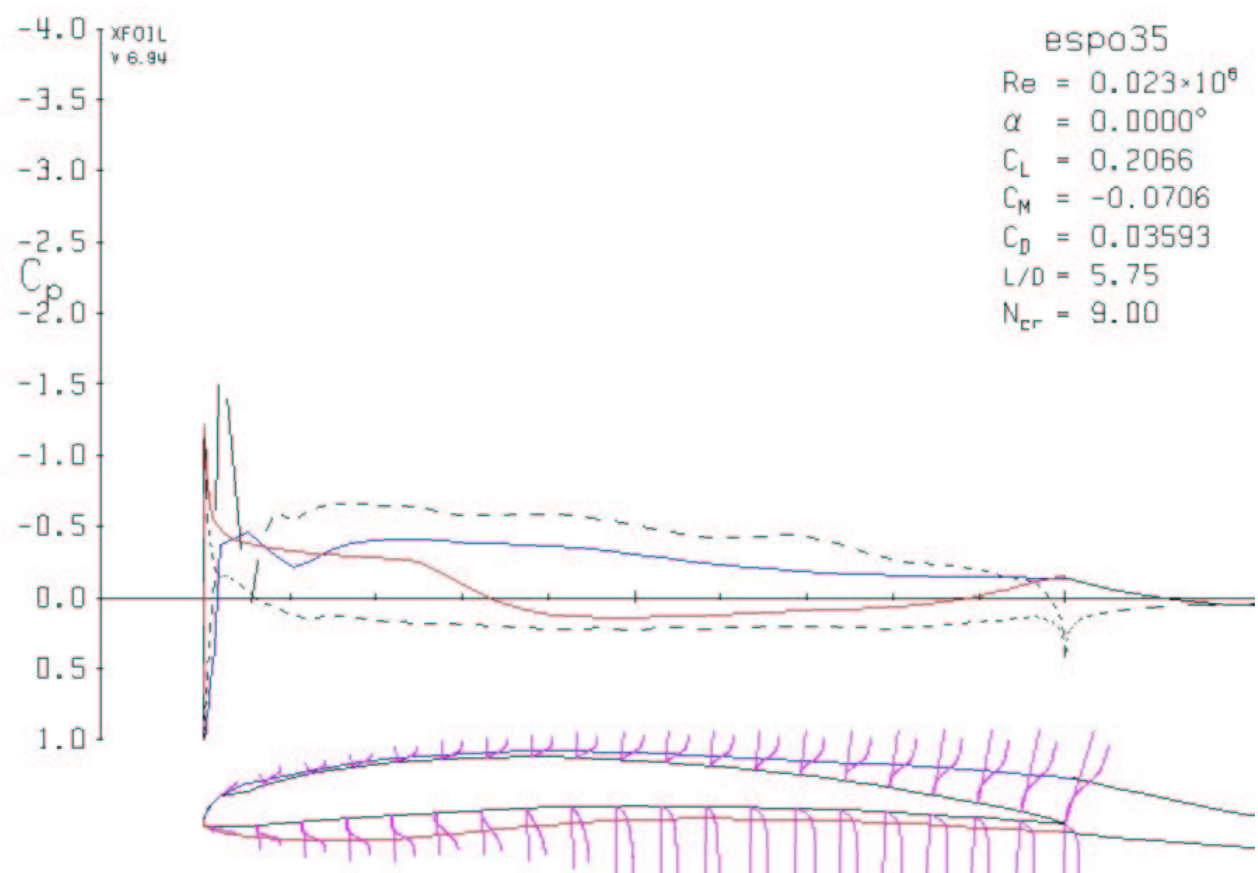
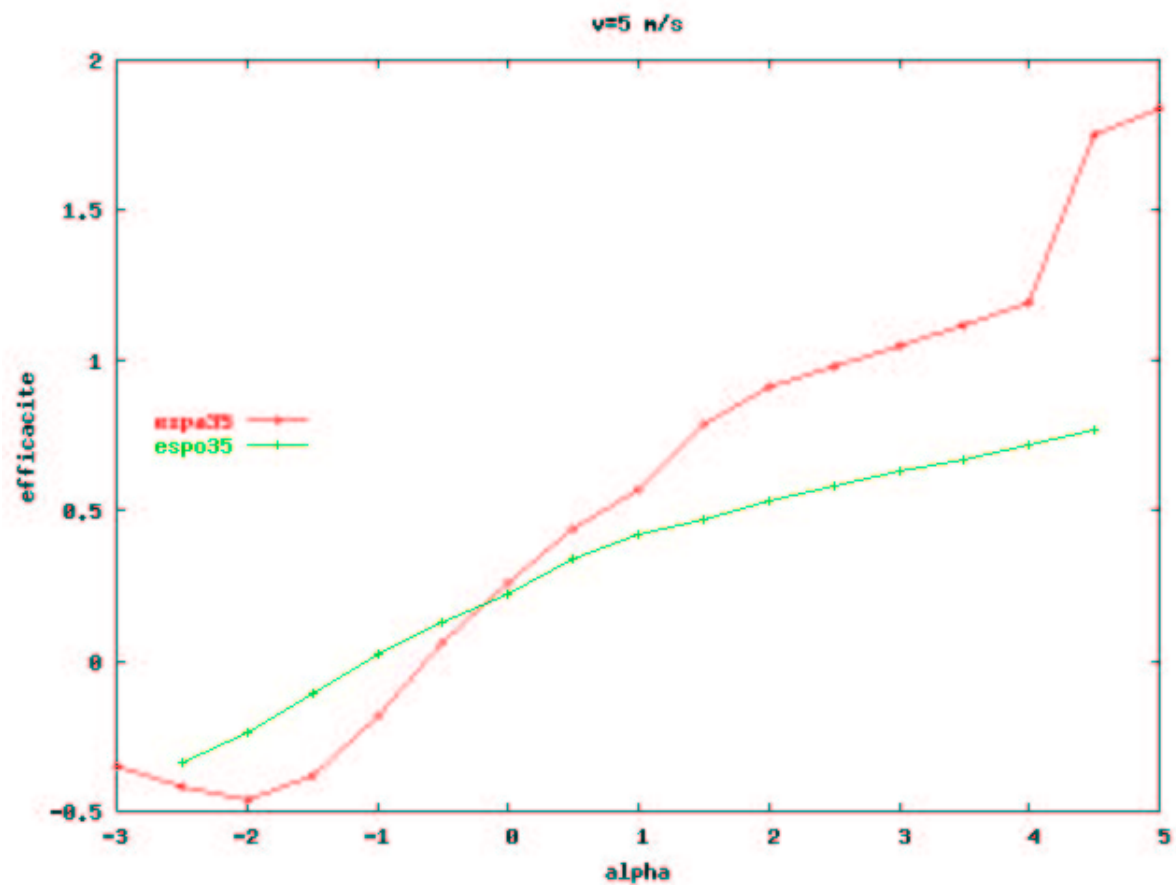
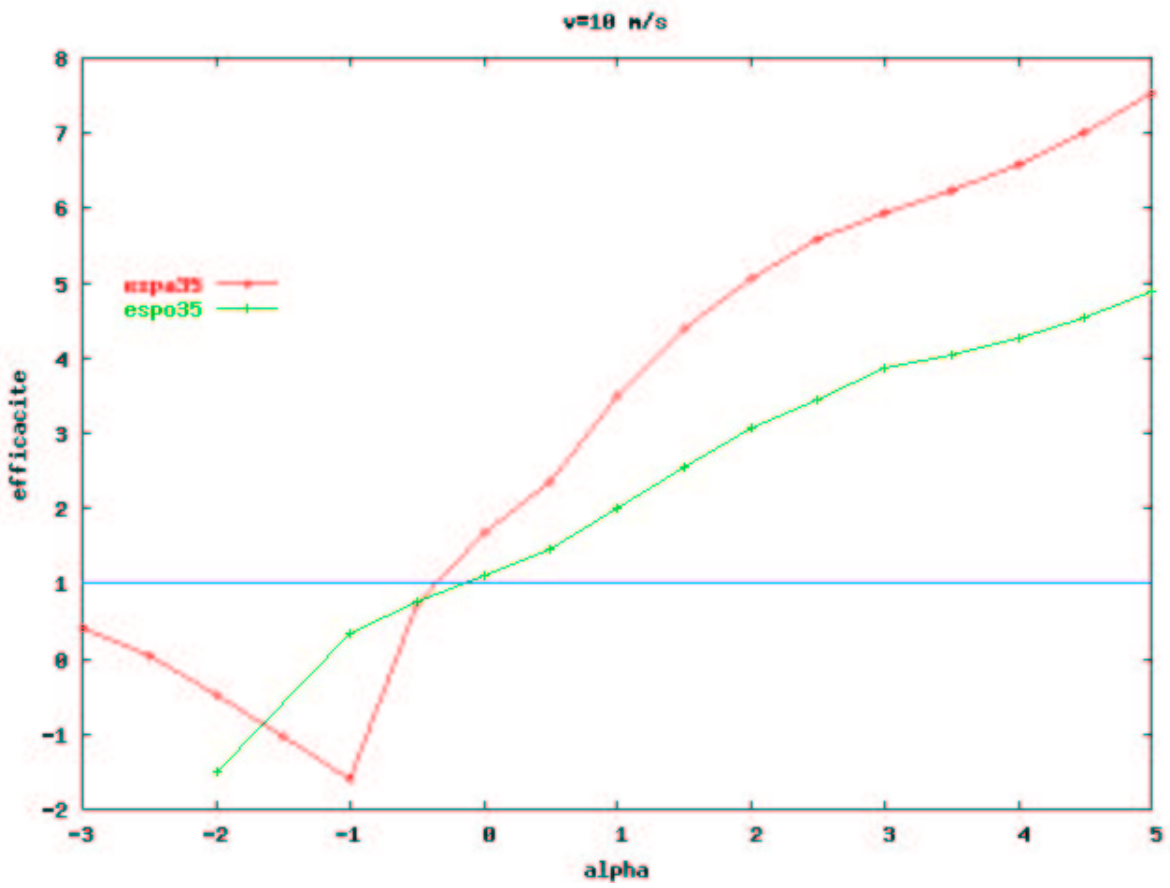
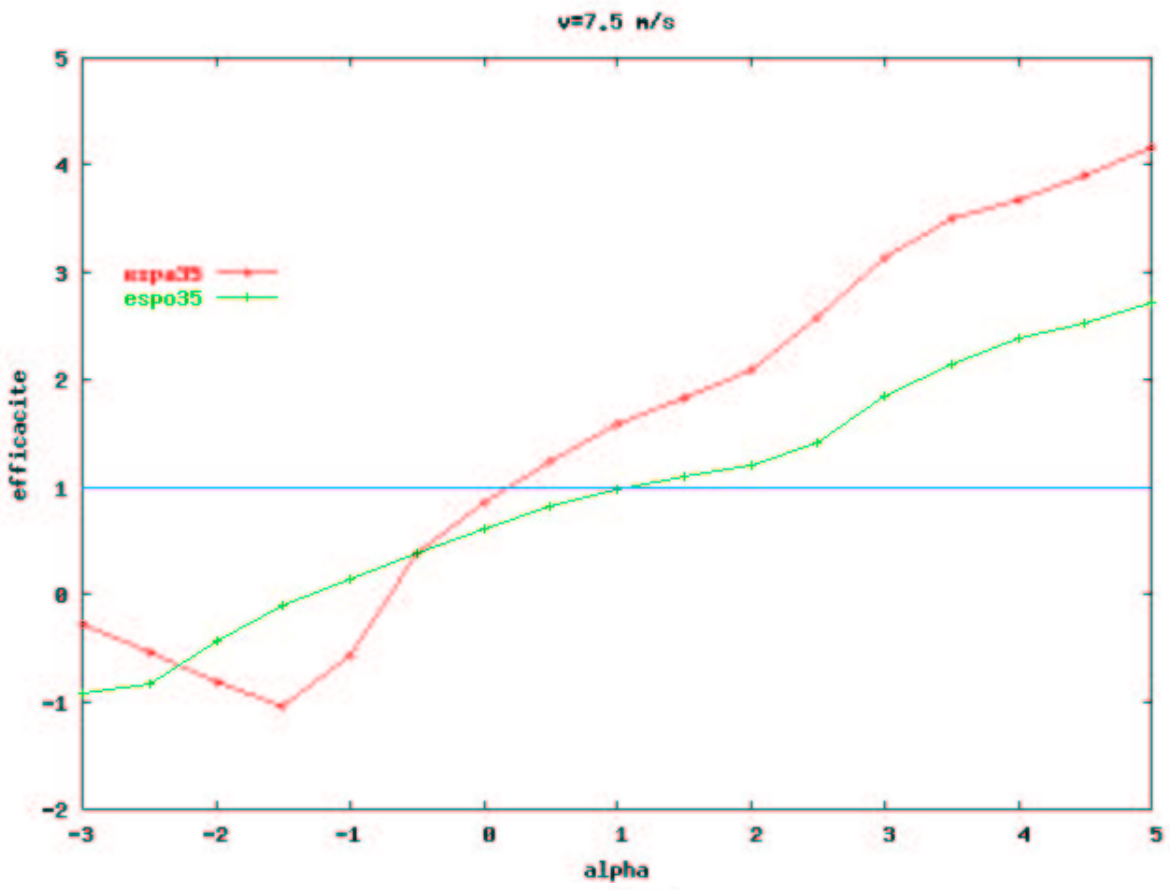


FIG. 28 – Polaire du profil d'épaisseur relative $\frac{e}{c} = \frac{3}{35}$.







10 Comparaison des profils

Les graphes suivant (tracés pour une vitesse donnée) représentent l'efficacité ϵ précédemment définie en fonction de la finesse $\frac{C_z}{C_x}$ du profil. Chaque courbe est relative à un profil différent et chaque point sur la courbe correspond à un angle différent (non précisé).

Afin de pouvoir comparer les profils, ces graphes sont éventuellement zoomés et tracés en échelle Log-Log qui a l'avantage de grossir les différences.

Ces courbes auraient tendance à me faire choisir un des profils suivant : "espada35t", "espada40t" ou "espa35" donc à profiler un maximum l'extrados, à creuser un maximum l'intrados et à mettre un gros turbulateur non loin du bord d'attaque ...

