

## LES POLAIRES

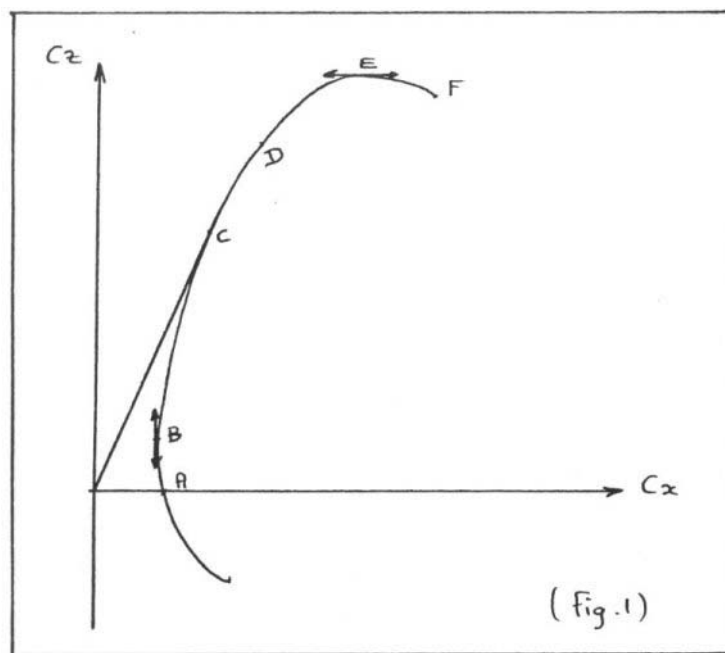
**Introduction :** Les polaires sont des courbes permettant de déterminer les caractéristiques d'un profil, d'une aile, d'un appareil. Elles sont par exemple très utiles pour comparer les profils entre eux, afin de choisir celui qui sera le mieux adapté à l'utilisation qu'on désire en faire.

**Remarques:**

① De nombreuses polaires font intervenir le nombre de Reynolds; il faut bien faire attention à ne comparer que des polaires réalisées à un même nombre de Reynolds.

② Les polaires des profils permettent de les comparer entre eux plutôt que de définir leurs performances exactes; en effet, elles n'ont pas toujours été établies avec précision (maquettes peu précises, souffleries non adaptées aux faibles vitesses de vol de nos planeurs et donc à des essais à faibles vitesses d'écoulement de l'air, polaires résultants de calculs à l'ordinateur...).

### Polaire coefficient de portance en fonction du coefficient de traînée : $C_z = f(C_x)$



On peut d'abord déduire de cette polaire les points remarquables suivants :

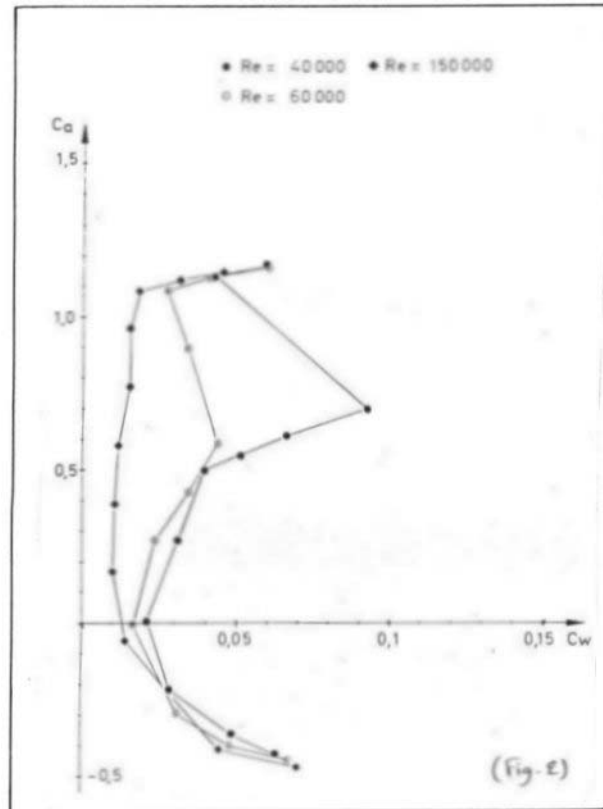
- point A : point de portance nulle à l'intersection de la polaire et de l'axe des  $C_x$ ; il donne la traînée à portance nulle.
- point B : point de traînée minimale; déterminé avec la tangente verticale à la courbe.
- point C : point de finesse maxi, déterminé avec la tangente à la courbe qui passe par l'origine; c'est le point pour lequel on a le plus grand rapport  $\frac{C_z}{C_x}$ .
- point D : point de vitesse de chute minimale déterminé par le calcul de  $\frac{C_x^3}{C_z^2}$  mini.
- point E : point de portance maximale, déterminé avec la tangente horizontale à la courbe.
- point F : point de décrochage.

La polaire  $C_z = f(C_x)$  représentée en (Fig.1) exprime par exemple la variation de  $C_z$  en fonction de  $C_x$  (pour un nombre de Reynolds donné car cette courbe se déplacerait si l'on faisait varier le nombre de Reynolds). A partir de cette polaire, on peut obtenir la polaire de l'aile équipée d'un tel profil. Si l'aile est rectangulaire, le  $C_z$  ne change pas, c'est celui du profil; seul le  $C_x$  augmente d'une valeur égale à la traînée induite résultant du fait que l'aile n'a pas une envergure infinie et qu'il existe donc des traînées marginales appelées traînées induites.

Donc pour obtenir la polaire de l'aile, il suffit de déplacer la polaire du profil vers les  $C_x$  croissants de la valeur  $C_{xi}$ .

On peut aussi obtenir la polaire du planeur complet en considérant que le fuselage et son empennage n'apportent aucune portance supplémentaire (les surfaces horizontales de l'empennage ne portent pas théoriquement si l'avion est bien centré) mais seulement de la traînée (traînée du fuseau + traînée des empennages + traînée résultant des interactions, c'est-à-dire des jonctions aile-fuselage et empennage-fuselage + traînée "parasites" (fils d'antenne, cockpit...)).

Donc pour obtenir la polaire du planeur complet à partir de laquelle on pourra tenter de trouver des valeurs de finesse, de chute mini ..., il faut encore décaler la polaire de l'aile en lui ajoutant toutes les traînée citées ci-dessus; ceci est représenté en (Fig.2).



En général, on ne fournit pas une seule polaire mais une famille de polaires tracées à des nombres de Reynolds différents. (cf Fig.2), où on voit un exemple de polaires  $C_z$  ( $C_x$ ) tracées pour l'Eppler 193.

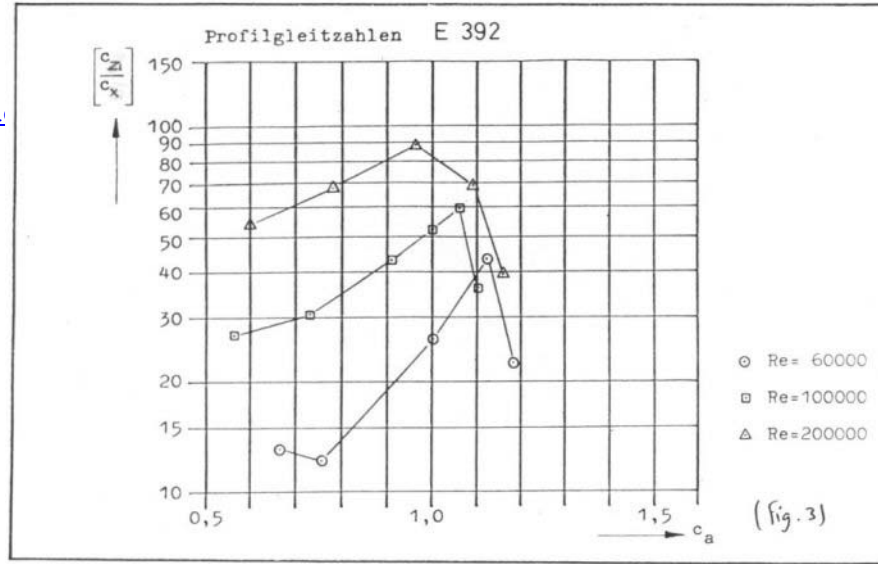
On voit que deux de ces polaires n'ont pas exactement la même forme que celle qui est représentée en (Fig.1); ce sont les deux polaires tracées à 40 000 et 60 000 Reynolds. Ceci est dû à une traînée plus forte car le profil travaillait en dessous de son nombre de Reynolds critique et ses caractéristiques en sont fortement affectées.

A partir d'une famille de polaires tracées à plusieurs nombres de Reynolds, on peut tracer d'autres courbes qui sont directement exploitables pour la comparaison de deux profils. ce sont les courbes  $\left(\frac{C_z}{C_x}\right)$  fonction de  $C_z$ ;  $\left(\frac{C_x^3}{C_z^2}\right)$  fonction de  $C_z$ ;  $\left(\frac{C_z}{C_x}\right)_{\text{maxi}}$  fonction de Re;  $\left(\frac{C_x^3}{C_z^2}\right)$  fonction de Re.

**Les courbes  $\left(\frac{C_z}{C_x}\right)$  fonction de  $C_z$  :**

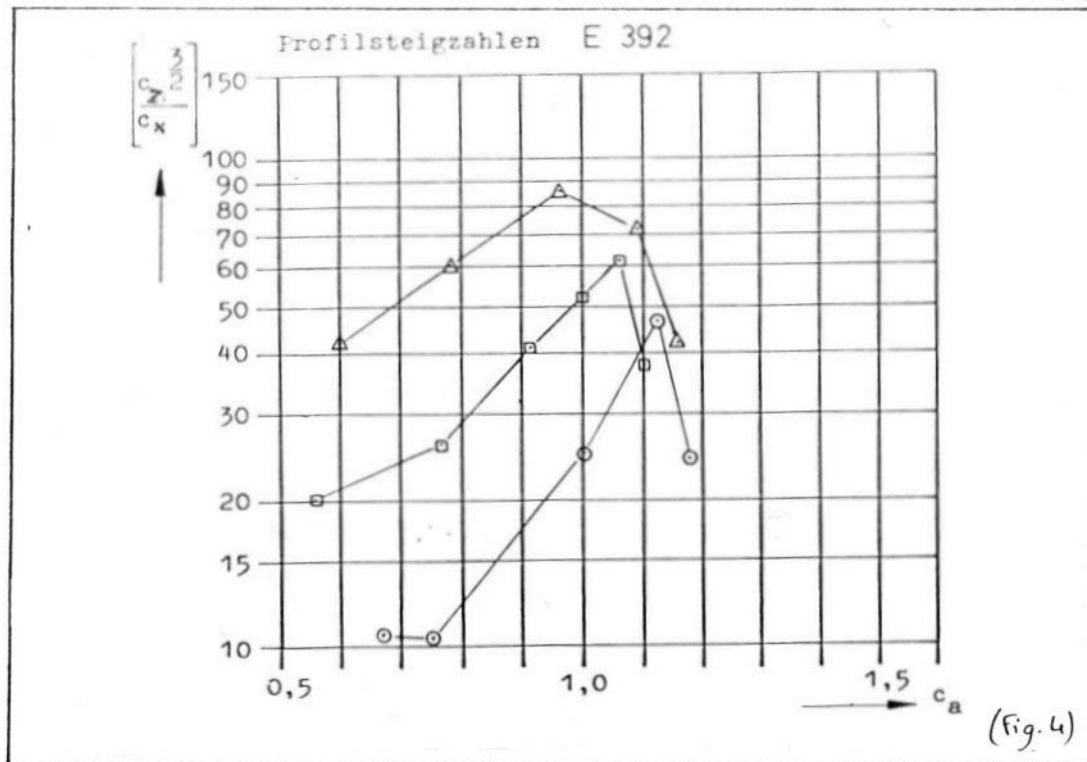
Elles permettent pour chaque nombre de Reynolds (donc pour chaque vitesse) de déterminer le point de finesse maxi du profil, c'est-à-dire la valeur de cette finesse maxi et la valeur du  $C_z$  lui correspondant (Fig.3).

<http://www.>



Les courbes  $\left(\frac{C_x^3}{C_z^2}\right)$  fonction de  $C_z$  :

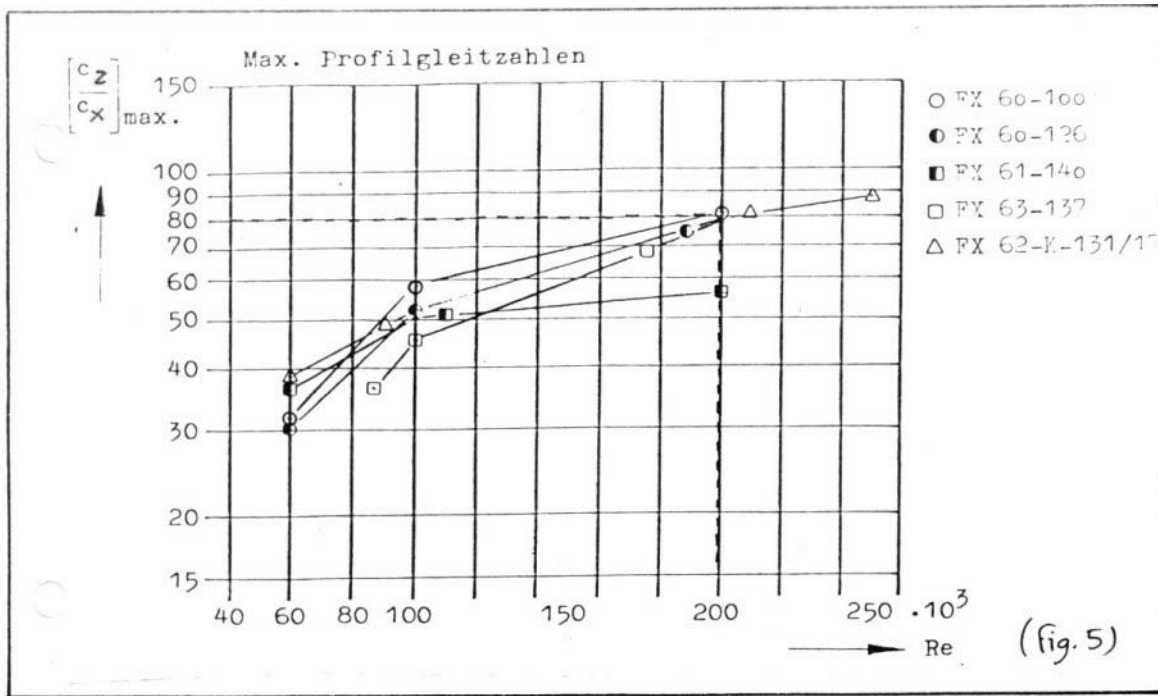
Elles permettent de trouver le point de vitesse de chute mini et la valeur du  $C_z$  correspondant à cette vitesse mini de chute (Fig.4).



Remarque : on voit que les valeurs de  $C_z$  correspondant à la finesse maxi sont très proches des valeurs correspondant à la vitesse de chute mini (ceci en comparant les (Fig.3) et (Fig.4) ); c'est une constatation classique en modèle réduit et il n'est généralement pas utile de faire les deux calculs tant l'écart est faible.

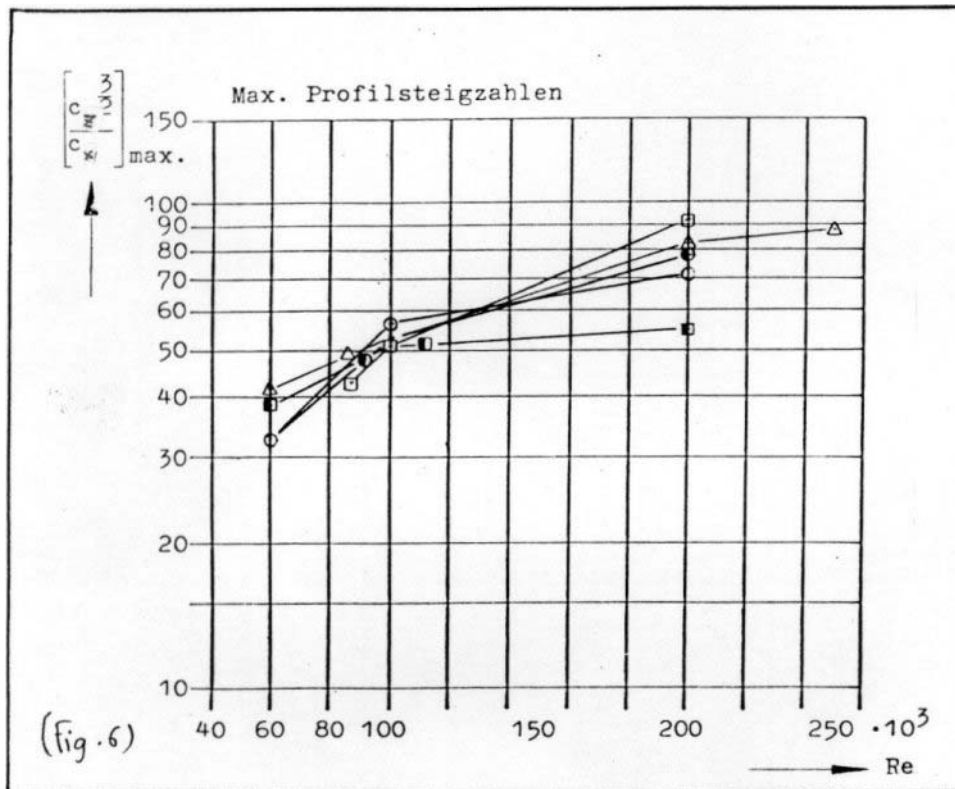
Les courbes  $\left(\frac{C_z}{C_x}\right)_{\text{maxi}}$  fonction de  $Re$  :

Ce sont les courbes qui permettent le mieux de comparer les profils (dans le cas où on désire obtenir une finesse maximum); elles sont de plus en plus souvent fournies pour plusieurs profils comme c'est le cas en (Fig.5) où on peut voir ces courbes tracées pour quelques profils Wortmann. On peut y constater par exemple que le profil FX 60.100 est le plus fin au dessus de 100 000  $Re$  mais que ses caractéristiques changent et baissent en dessous de 100 000  $Re$ ; il ne faudra donc employer ce profil que si l'on est sûr de voler à des  $Re$  supérieurs à 100 000.



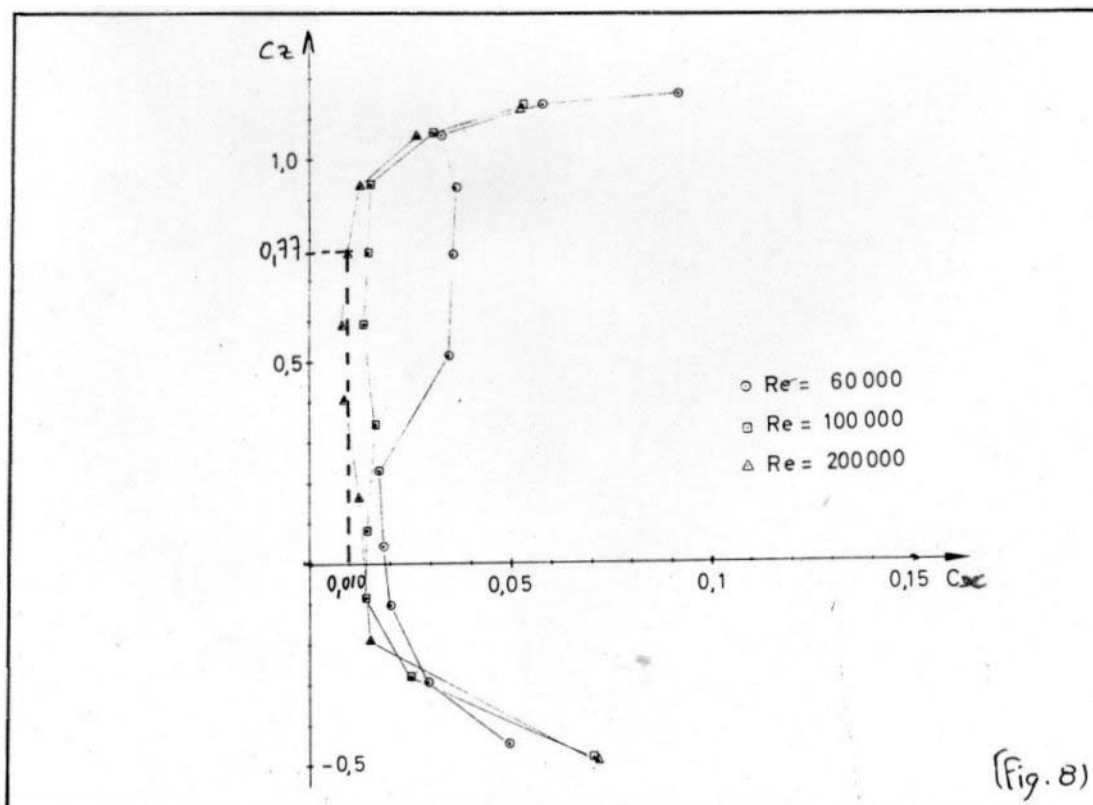
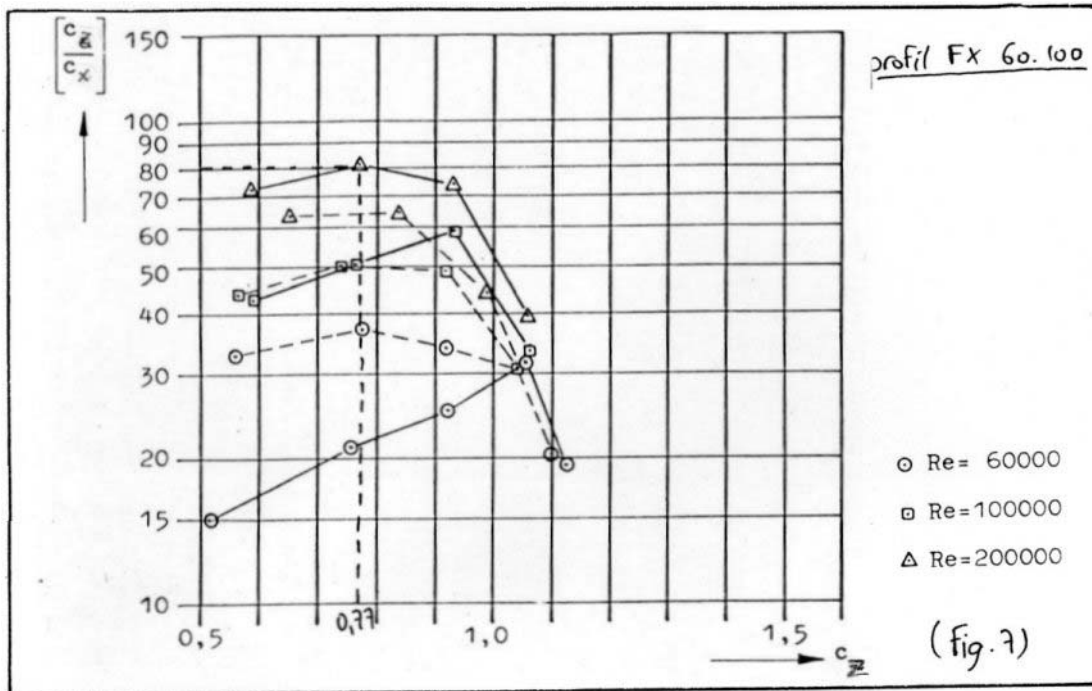
Les courbes  $\left( \frac{C_x^3}{C_z^2} \right)_{\max}$  fonction de  $Re$  :

Elles permettent d'établir un classement des profils en considérant cette fois leur vitesse de chute mini; on peut constater qu'au dessus de 125 000  $Re$ , c'est le profil FX 63.137 qui chutera le moins, alors qu'aux faibles nombres de Reynolds, on lui préférera le FX 62.K.131/17



**Conclusion :** l'observation de ces courbes permet de choisir le profil le plus adapté à la conception du planeur. elle permet aussi de trouver le point de fonctionnement du profil :

Exemple : le choix s'est porté sur le profil FX 60.100 car c'est celui qui offre la meilleure finesse. Après avoir estimé la vitesse du planeur, on connaît le nombre de Reynolds qui sera de 200 000; on en déduit sa finesse maxi : 80, on reporte ce nombre sur la courbe  $\left(\frac{C_z}{C_x}\right)$  fonction de  $C_z$  (Fig.7) et on obtient  $C_z = 0,77$ . Ce nombre reporté sur la (Fig.8) permet de déterminer  $C_x = 0,010$  (Attention, pour ces deux dernières déterminations, il faut bien prendre la courbe à  $Re = 200\ 000$ ).

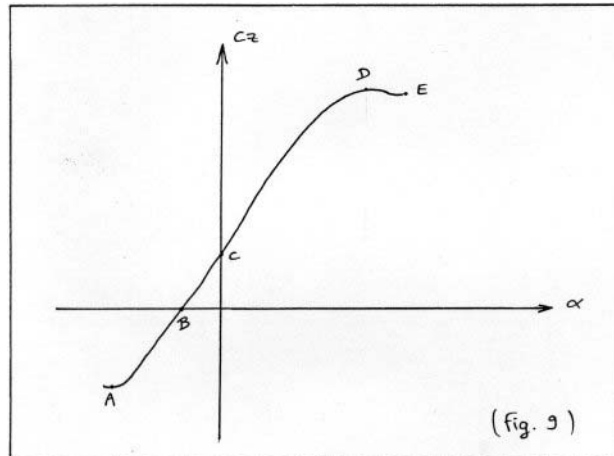


Une fois que l'on a déterminé le nombre de Reynolds auquel le profil va évoluer, sa finesse, son  $C_z$ , son  $C_x$ , on peut déterminer l'angle d'incidence grâce à la courbe  $C_z$  fonction de  $\alpha$  (angle d'incidence); ceci permettra par exemple de calculer l'angle de calage de l'aile sur le fuselage.

Donc, la détermination de l'angle d'incidence à partir du  $C_z$  est une des utilisations des...

**...Courbes  $C_z$  fonction de l'incidence  $\alpha$  :**

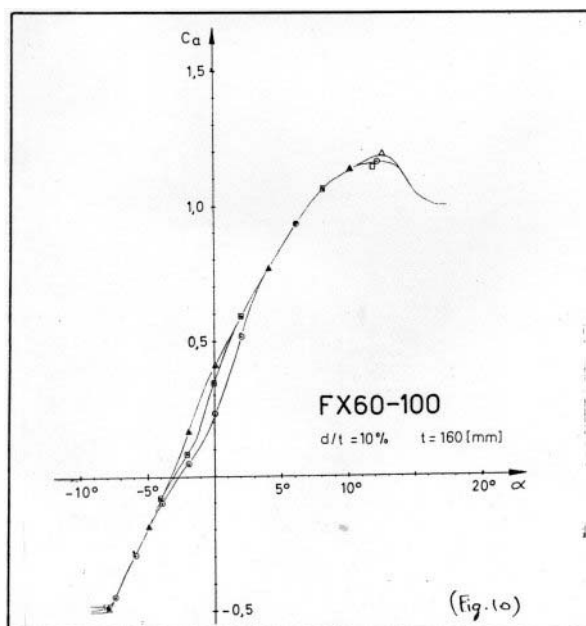
ces courbes représentent l'évolution du  $C_z$  du profil en fonction de l'angle d'incidence. Elles ont l'allure représentée en (Fig.9):



- point A : le profil a une portance négative (cas du vol dos par exemple) entre les points A et B; ceci signifie qu'il y a une pression à l'extrados et une dépression à l'intrados; au point A, on est au minimum de portance, c'est-à-dire à la portance négative maximale.
- point B : c'est le point correspondant à la portance nulle; L'angle correspondant à la portance nulle est souvent noté  $\alpha_0$  ou  $\beta$ .
- point C : point d'incidence nulle : la vitesse de l'aile par rapport à l'air qui l'environne est parallèle à la corde du profil. Permet de connaître  $C_z$  à incidence nulle.
- point D : point de portance maxi; si l'on augmente l'incidence au delà de la valeur obtenue pour ce point, le phénomène de décrochage apparaît et le  $C_z$  chute.

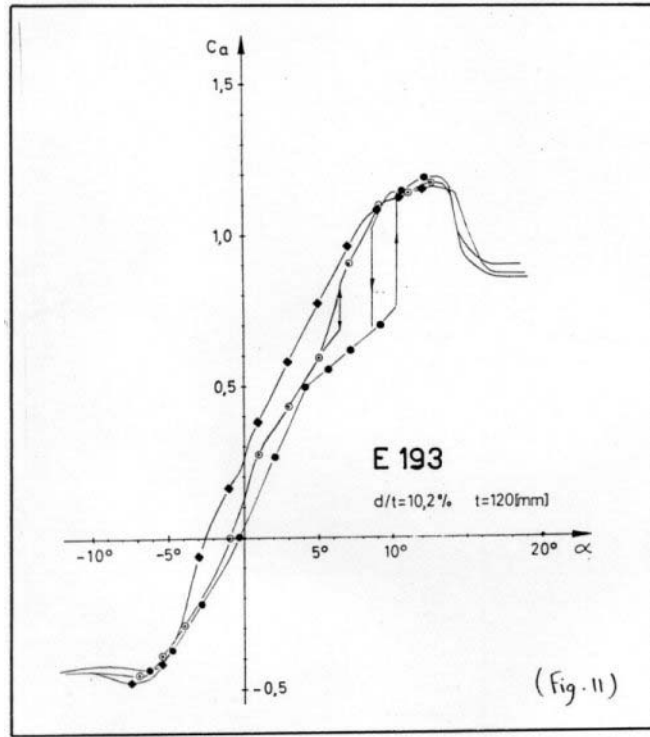
**Exemple:**

La polaire de la (Fig.10) représente la variation de  $C_z$  en fonction de l'angle d'incidence pour le profil FX 60.100; on voit que les trois courbes tracées à trois nombres de Reynolds différents sont relativement similaires.



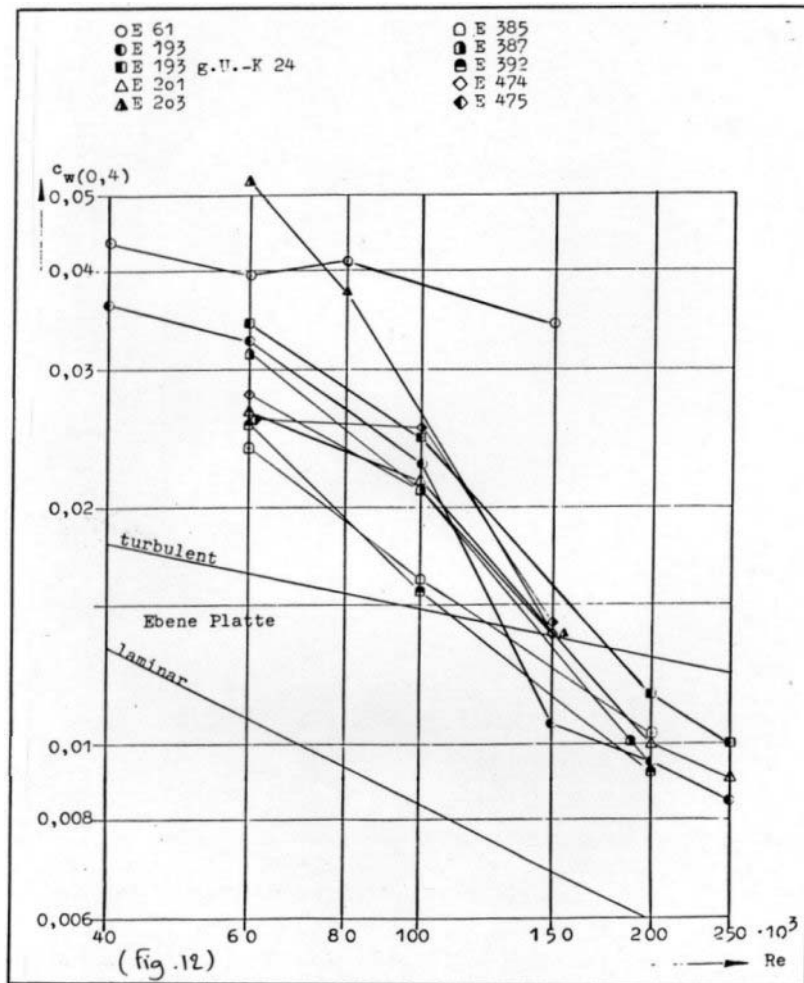
Par contre, dans le cas de l'Eppler 193 (Fig.11), les comportements de  $C_z$  quand  $\alpha$  varie dépendent plus sensiblement du nombre de Reynolds  $\Rightarrow$  il y a plusieurs angles de portance nulle suivant le  $Re$  !!

De plus, on peut remarquer un phénomène d'hystérésis sur la polaire tracée avec des points  $\bullet$ .



**Courbes  $C_x(0,4)$  fonction de  $Re$  :**

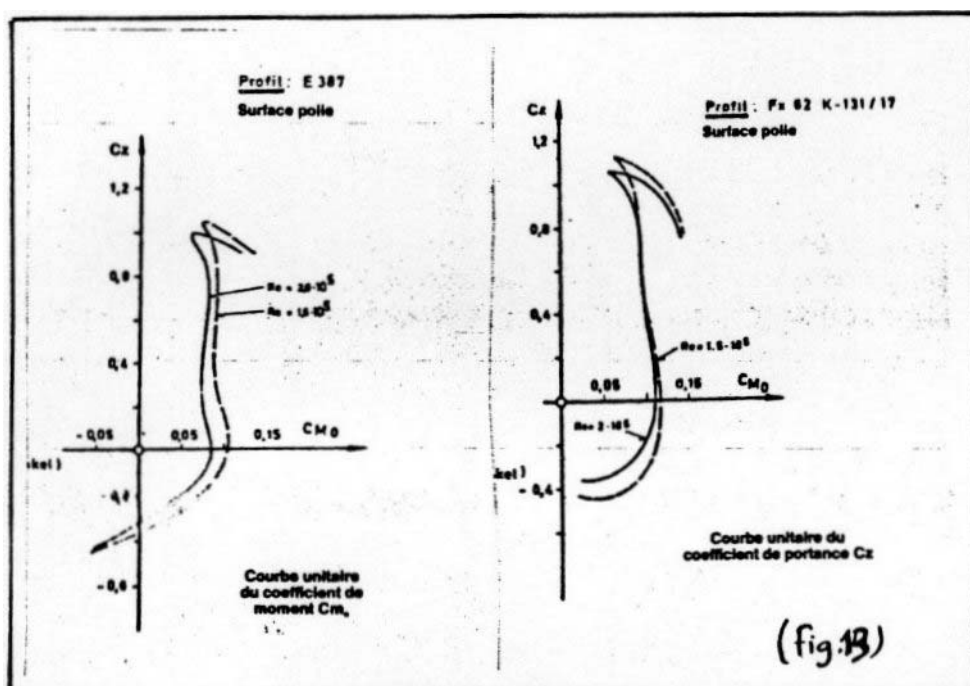
Ces courbes ont pour but de comparer les profils entre eux avec d'autres critères que des critères extrêmes (finesse maxi, vitesse de chute mini...). Ici, on fixe le  $C_x = 0,4$  et on étudie la variation du  $C_z$  qui lui correspond pour chaque profil en fonction de  $Re$  (cf Fig.12).



**Courbes Cz fonction de Cmo :**

Elles sont utiles pour effectuer un calage optimal de l'aile sur le fuselage et un centrage correct du planeur. en effet, pour la plupart des formules qui font intervenir Cmo, on considère ce dernier comme constant.

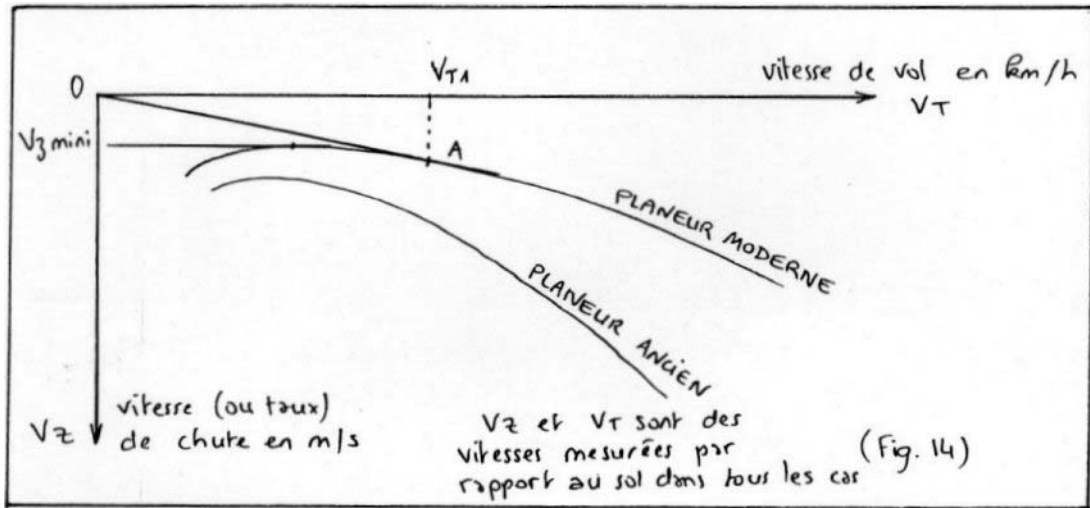
Il l'est dans la mesure où on vole entre le décrochage (ou le point de portance maxi) et les Cz négatifs. Par contre, il varie avec le nombre de Reynolds et on ne peut alors plus le considérer comme constant; il faut des courbes telles que la (Fig.13) pour le déterminer.





### La polaire des vitesses :

elle représente les performances du planeur à différentes vitesses de vol.  
Elle exprime la valeur de  $V_z$  (vitesse verticale) en fonction de la vitesse de vol (vitesse sur trajectoire).  
(cf Fig.14) .



#### Points caractéristiques :

- *Le point de finesse maxi en air calme :*

Si l'air n'est animé d'aucun mouvement (pas d'ascendance, de vent...), la finesse par rapport à la masse d'air qui entoure le planeur est la même que la finesse par rapport au sol (elle s'exprime par le rapport  $\frac{\text{distance horizontale parcourue}}{\text{chute lui correspondant}}$  ou encore par les rapports  $\frac{C_z}{C_x}$  du planeur, ou  $\frac{V_H}{V_z}$ ,  $V_H$  étant la vitesse horizontale et  $V_z$  la vitesse verticale.

Si, sur la polaire de la (Fig.14) on mène la tangente passant par l'origine, on obtient le rapport  $\left(\frac{V_T}{V_z}\right)_{\text{maxi}}$ , où  $V_T$  est la vitesse sur trajectoire; en fait, surtout sur les vrais planeurs, on néglige l'erreur faite en considérant que le rapport  $\left(\frac{V_T}{V_z}\right)_{\text{maxi}}$  donne la finesse maxi, alors qu'il faudrait considérer le rapport  $\left(\frac{V_H}{V_z}\right)_{\text{maxi}}$ . On prendra donc A comme point représentant la finesse maxi et c'est lui qui nous fournira les valeurs de  $V_z$ ,  $V_T \approx V_H$  correspondant au vol à finesse maxi du planeur.

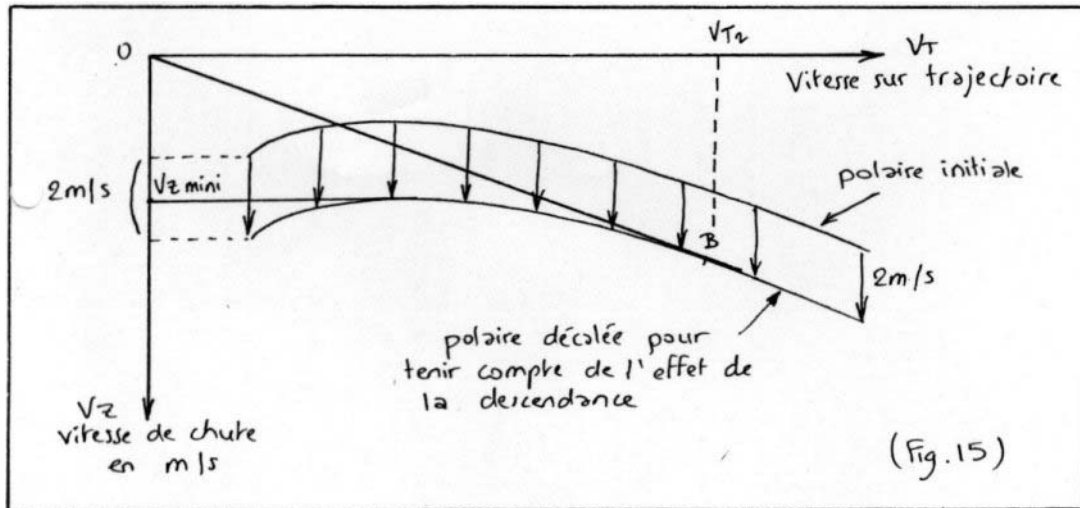
- *Le point de taux de chute mini :*

On trace une tangente horizontale à la polaire et on obtient  $V_z$  mini, la vitesse de chute minimale; ce point est utilisé par le pilote lorsque, volant en air calme, il veut prolonger son vol le plus longtemps possible.

#### Détermination de ces points lorsque le planeur traverse une masse d'air animée d'un mouvement vertical :

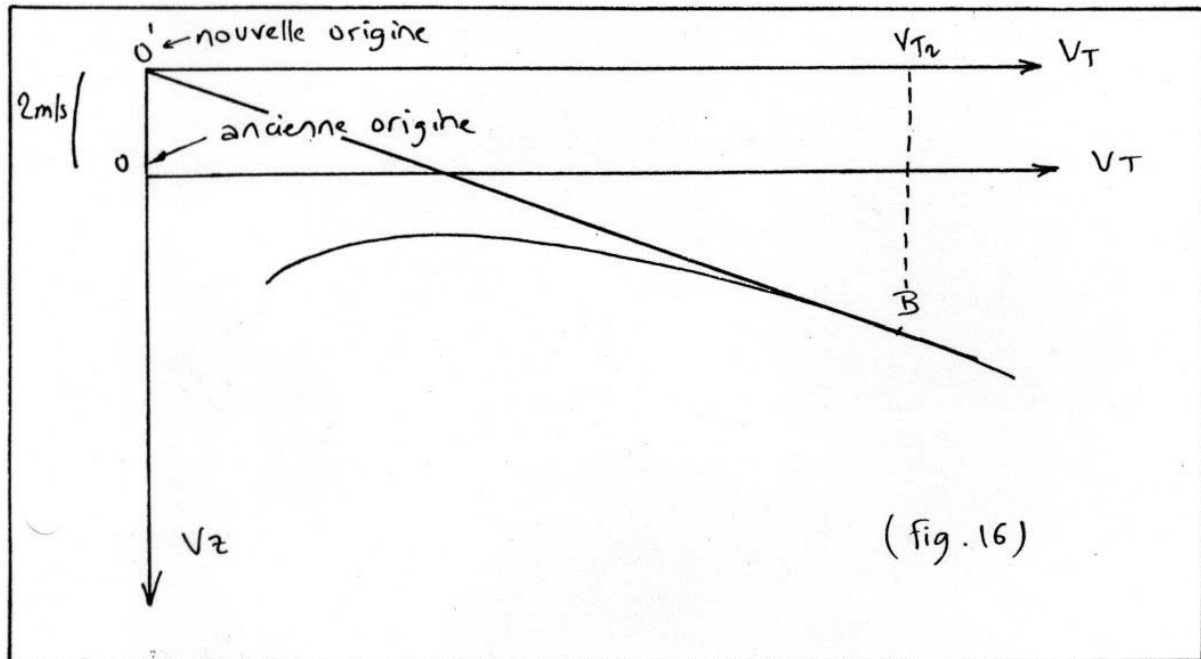
On veut donc déterminer les caractéristiques du planeur par rapport au sol.

Si le planeur traverse une zone descendante ou l'air chute uniformément à 2 m/s; toutes les vitesses de chute du planeur par rapport au sol sont à augmenter de 2 m/s; il faut donc tracer une polaire décalée de 2 m/s vers le bas (Fig.15).



On peut alors déterminer la nouvelle finesse maxi (point B) et la nouvelle vitesse de chute mini ( $V_z$  mini) en menant respectivement une tangente à la courbe issue de l'origine et une tangente horizontale.

En fait, décaler la polaire de 2 m/s vers le bas revient au même que de décaler l'origine de 2 m/s vers le haut (cf Fig.16).



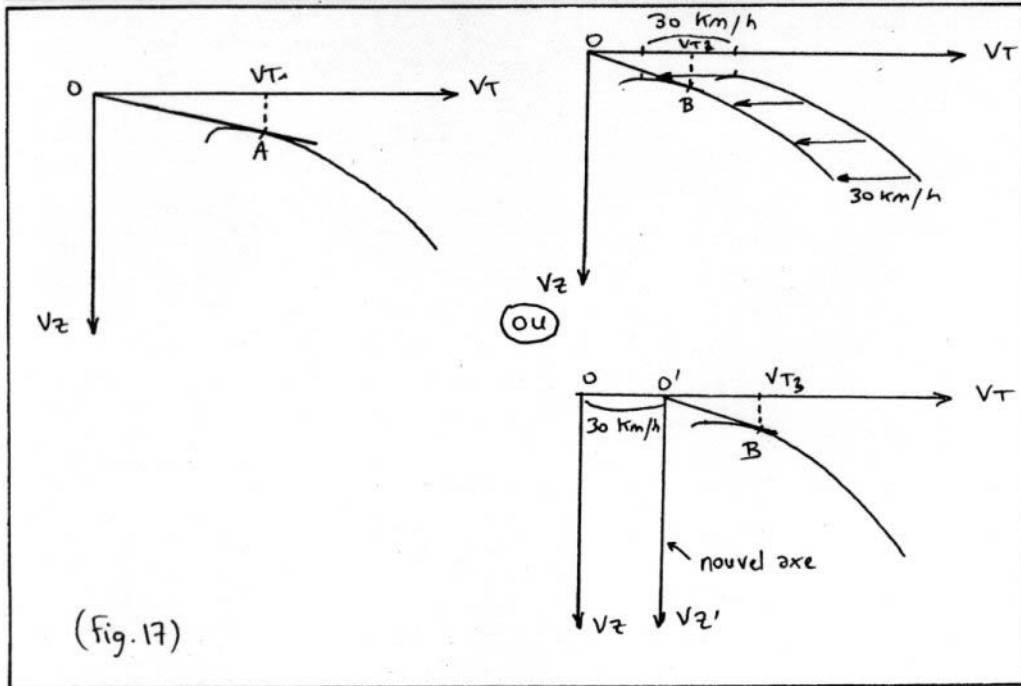
**En conclusion:** dans une masse d'air descendante vous devez voler plus vite pour garder la meilleure finesse possible (on voit en effet que la vitesse sur trajectoire  $V_{T2}$  permettant d'obtenir la finesse maximale pour un planeur traversant une masse d'air descendante est supérieure à  $V_{T1}$  trouvée dans des conditions d'air calme). Il est cependant évident que cette finesse est fortement diminuée.

**Remarque:** dans une ascendance, si on la traverse en ligne droite, on a intérêt à voler à  $V_z$  mini pour que le taux de chute du planeur soit le plus faible possible.

Détermination de la finesse maxi par rapport au sol d'un planeur subissant du vent:

Si le planeur vole avec un vent de face de 30 km/h, il faudra déduire 30 km/h des vitesses de vol.

En reprenant le raisonnement tenu pour les mouvements d'air verticaux, il faudrait tracer une polaire décalée de 30 km/h vers la gauche ou décaler l'origine de 30 km/h vers la droite (cf Fig.17).



La finesse maxi sans vent est représentée par le point A qui correspond à la vitesse sur trajectoire  $V_{T1}$ .

La finesse maxi avec vent de 30 km/h de face a diminué et la vitesse sur trajectoire par rapport au sol également.

**Conclusion :** quand le planeur se dirige vers un point du sol avec vent de face, il faut voler plus vite (par rapport à la masse d'air) pour garder la meilleure finesse par rapport au sol possible. Il est cependant évident que cette finesse est fortement diminuée.

**Remarque :** à partir de la polaire  $C_x, C_z$  du planeur et de la formule  $V_T = 4 \cdot \sqrt{\frac{M}{S \cdot C_z}}$  où M est la masse du planeur en kg et s sa surface alaire en  $dm^2$ ,  $V_T$ , la vitesse sur trajectoire en m/s, on peut tracer la polaire du planeur en  $V_i, V_z$  qui permettra de connaître ses performances et les réglages à lui appliquer selon le vent.