

Petit panorama des profils de stab



Ce 4^{ème} épisode d'histoires d'empennages est consacré aux profils adaptés aux stabilisateurs horizontaux de nos planeurs.

Plusieurs questions relatives aux choix des profils y sont traitées :

- Comment comparer les performances de 2 profils en vue d'une utilisation sur un stab à volet ?
- Quel est l'intérêt des stab asymétriques ?
- Quels sont les critères prendre en compte pour choisir un profil de stab ?

En synthèse un tableau présente les caractéristiques de 24 profils de stab différents dont 2 nouveaux profils TP , l'un (TPstab-F3F) plutôt destiné au F3B/F3F et l'autre (TPstab-60) destiné au 60 pouces/F3K.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, 2 points importants méritent d'être rappelés :

- Toutes les analyses présentées dans cet article sont basées sur les résultats d'Xfoil. Or si Xfoil est le meilleur outil dont nous disposons pour analyser les profils, il ne faut pas oublier qu'il ne s'agit que d'un modèle de calcul et non de la réalité. Les résultats sont d'autant moins fiables que le nombre de Reynolds est faible, l'incidence proche du décrochage, et les braquages de gouvernes importants. Certains comportements prédits par Xfoil ne semblent pas toujours être observés (zone de flou autour du neutre sur certains profils, fortes variations de C_m ou de la pente $C_z=f(\alpha)$...)
- le stabilisateur horizontal ne représente en général qu'environ 10% de la surface de l'aile, en conséquence un gain même important sur la traînée du stab ne se traduit que par un gain très faible, voire négligeable, sur la traînée globale du modèle. Au final, si un planeur a été correctement conçu et réalisé (volume de stab adapté, respect des profils, etc...) un changement de stab a peu de chance d'amener une amélioration très perceptible de la perfo pure au cœur du domaine de vol. Par contre certaines améliorations du comportement peuvent éventuellement être perceptibles en limite de domaine de vol (maniabilité, décrochage, comportement en virage serré ou sur le dos, phase de lancer pour un F3K...)

1) Comment comparer les performances des stab à volet

Comparer les performances de 2 stab à volet utilisant des profils différents (voire des dimensions de volet différentes) n'est pas aussi facile qu'il y paraît : la comparaison des polaires $C_z=f(C_x)$ en lisse ou pour un même braquage du volet (comme cela se fait couramment pour les profils d'aile) ne suffit pas et peut conduire à des erreurs d'analyse.

En effet, pour que 2 stab produisent exactement le même effet en virage il faut non seulement qu'ils aient le même C_z .stab mais il faut aussi que le braquage du volet de profondeur produise le même $\Delta\alpha_0$ (que l'on assimile au braquage ΔV_{longi} d'un stab pendulaire).

Rappel : Le C_z .stab est essentiellement lié à l'équilibre du planeur et donc aux paramètres C_z et C_{m0} de l'aile, tandis que le ΔV_{longi} ou $\Delta\alpha_0$ nécessaire en virage est essentiellement lié au rayon de virage et à la longueur du bras de levier arrière.

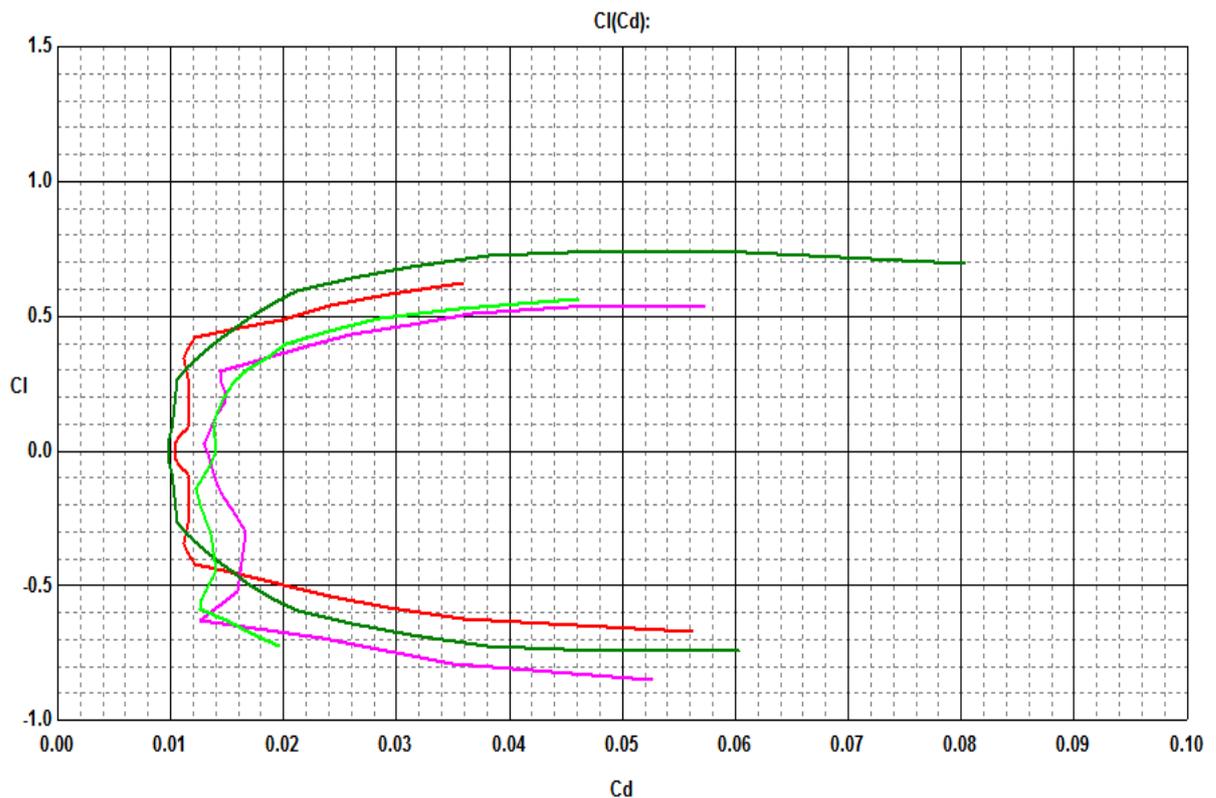
Or on constate que pour une même valeur $\Delta\gamma$ du braquage profondeur tous les profils ne donnent pas le même $\Delta\alpha_0$: certains profils présentent une efficacité de volet bien supérieure à d'autres (l'efficacité de volet est définie par le rapport $A = \frac{\Delta\alpha_0}{\Delta\gamma}$). Les différences sont surtout sensibles pour des nombre de Reynolds inférieurs à 300k, ce qui correspond exactement à la gamme de fonctionnement des stab de nos planeurs !

En conséquence, ce n'est pas parce que 2 profils ont à peu près les mêmes polaires $C_z=f(C_x)$ pour un braquage de volet donné qu'ils sont équivalents car il peuvent avoir des efficacités très différentes en terme de $\Delta\alpha_0$. Pour éviter les erreurs, les comparaisons ne doivent pas se faire pour des braquages profondeur identiques mais pour des $\Delta\alpha_0$ identiques.

Voici une démarche de comparaison des profils TP29-7% et HD801 à $Re=100k$ pour un volet profondeur à 30% de la corde :

- Si on compare les polaires des profils $C_z=f(C_x)$ pour des braquages identiques (soit 0° et -6° dans l'exemple ci-dessous), on obtient le résultat suivant :

- 'HD801 - Copyright (c) 1994 Hannes Delago' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00
- 'HD801 - Copyright (c) 1994 Hannes Delago' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -6.00 degrees, hinged at 30.00%
- 'TP29-7%' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - T.E. thickness -> 0.00% blending 30.00%
- 'TP29-7%' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -6.00 degrees, hinged at 30.00%



En lisse (courbes vert foncé et rouge), TP29-7% est légèrement meilleur (jusqu'à près de 10%) que HD801 pour des C_z compris entre $C_z = -0.3$ et $C_z = +0.3$

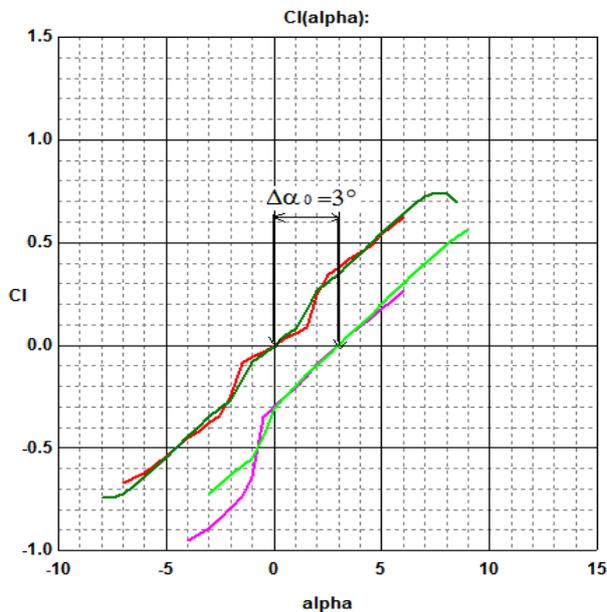
Volet 6° à cabrer (courbes vert clair et rose), TP29-7% est jusqu'à 20% meilleur que HD801 pour les C_z négatifs, par contre les 2 profils semblent à peu près équivalents pour les C_z positifs

En vérité l'écart entre TP29-7% et HD801 est nettement plus important que ce que laisse penser cette première analyse. La démarche à suivre pour une analyse rigoureuse (à iso $\Delta\alpha_0$) est la suivante :

- Tracer les polaires $C_z=f(\alpha)$ de TP29-7% pour 2 valeurs de braquage du volet de profondeur (exemple 0° et -6°)
- Tracer la polaire de HD801 le braquage 0°
- Tracer la polaire $C_z=f(\alpha)$ de HD801 en ajustant le braquage profondeur de façon à ce que la courbe $C_z=f(\alpha)$ se superposent le mieux possible avec celle de TP29-7% volet braqué

On obtient le résultat suivant :

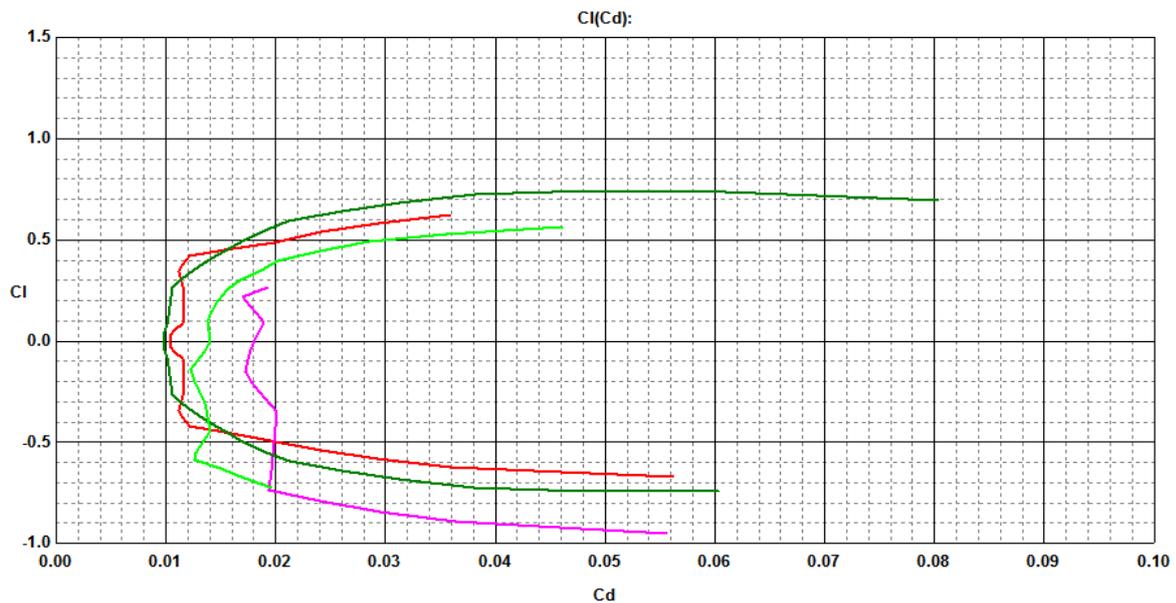
— 'HD801 - Copyright (c) 1994 Hannes Delago' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00
— 'HD801 - Copyright (c) 1994 Hannes Delago' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 [flap defl. -9.40 degrees] hinged at 30.00%
— 'TP29-7%' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - T.E. thickness -> 0.00% blending 30.00%
— 'TP29-7%' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 [flap defl. -6.00 degrees] hinged at 30.00%



On constate qu'à $Re=100k$ TP29-7% possède une efficacité de volet bien supérieure à celle de HD801. En effet, pour obtenir un même $\Delta\alpha_0$ de 3° (et donc un même rayon de virage), il faut 6° de profondeur avec TP29-7 et 9.4° avec HD801.

Dans ces conditions les polaires $C_z=f(C_x)$ sont les suivantes :

— 'HD801 - Copyright (c) 1994 Hannes Delago' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00
— 'HD801 - Copyright (c) 1994 Hannes Delago' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -9.40 degrees, hinged at 30.00%
— 'TP29-7%' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - T.E. thickness -> 0.00% blending 30.00%
— 'TP29-7%' at 100000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -6.00 degrees, hinged at 30.00%

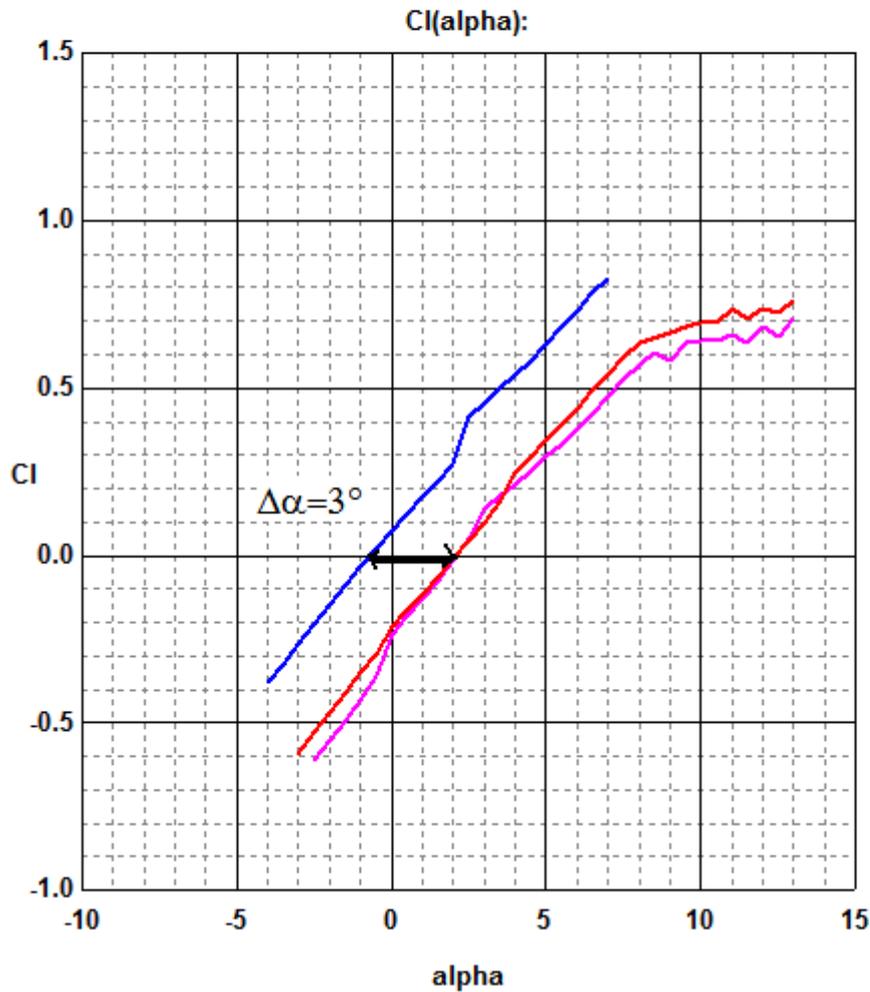


Volet braqué pour un même rayon de virage (même $\Delta\alpha_0$), HD801 présente de 20% à 30% de traînée de plus que TP29-7% pour les C_z positifs et jusqu'à 40% de plus pour les C_z négatif !

Cette méthode de comparaison des traînées de braquage à iso $\Delta\alpha_0$ paraît bien plus pertinente que la comparaison classique à iso braquage. Cette façon de faire est également recommandée pour analyser la traînée de braquage des profils de voltige (pour un même taux de roulis) ou encore pour comparer les traînées de 2 stab utilisant la même géométrie et le même profil mais avec des cordes de volet différentes.

Voici à titre d'exemple une comparaison de 2 stab de F3K à profil HT22, l'un avec une corde de volet de 30% et l'autre avec une corde de 60%.

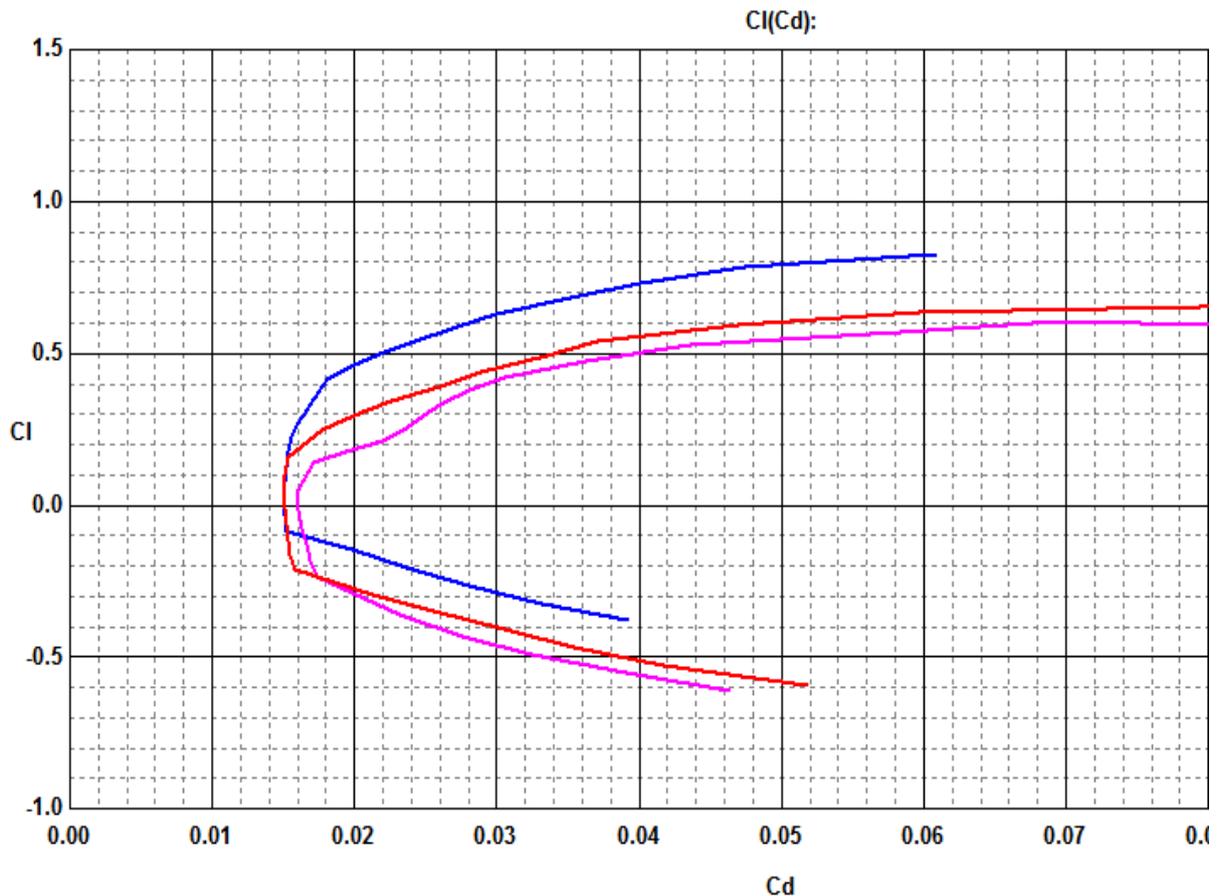
- 'HT22' at 40000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00
- 'HT22' at 40000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -6.00 degrees, hinged at 30.00%
- 'HT22' at 40000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -3.30 degrees, hinged at 60.00%



Pour un $\Delta\alpha_0$ d'environ 3° , il faut un braquage profondeur de 6° si le volet fait 30% de la corde (courbe rose) et un braquage de seulement 3.3° avec un volet à 60% de la corde (courbe rouge)

Dans ces conditions les polaires $C_z = f(C_x)$ sont les suivantes :

- 'HT22' at 40000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00
- 'HT22' at 40000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -6.00 degrees, hinged at 30.00%
- 'HT22' at 40000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -3.30 degrees, hinged at 60.00%



Pour même rayon de virage correspondant à $\Delta\alpha_0 = 3^\circ$:

- un volet à 30% de la corde (courbe rose) augmente le $Cx.stab$ en virage d'environ 7% à 10% pour $Cz.stab$ compris entre -0.2 et -0.15 (soit un delta de perfo en virage inférieur à 0.5% pour le planeur complet)
- un volet à 60% de la corde (courbe rouge) donne pour 3.3° de braquage un Cx identique à celui du profil en lisse dans une gamme de Cz allant de $Cz.stab = -0.2$ à $+0.15$. En fait dans ces conditions (stab à cambrure positive et faible débattement) le stab à volet est tout à fait équivalent au stab pendulaire en termes de traînée et même meilleur lorsque les réglages du planeur sont tels que $Cz.stab$ est fortement négatif en virage (soit centrage très avant + fort braquage des volets).

Conclusion : Une corde importante du volet de profondeur permet généralement de réduire la traînée de braquage (en vol ventre). Le choix de Mark Drela d'une corde de 60% sur le profil HT22 pour le volet de profondeur du Supergee est donc tout à fait pertinent : pour les faibles débattements la solution stab à volet peut alors être quasiment équivalente à la solution stab pendulaire.

2) Quelques réflexions sur les profils asymétriques

Les profils asymétriques ne sont pas une nouveauté sur les stab de nos modèles : les planeurs de vol libre les utilisent depuis longtemps, et le profil S8025 apparu dans les années 90 a été longtemps une référence en F3B. Plus récemment les profils asymétriques ont été utilisés en F3K (profils HT22 ou Zone Horizontal). Pourtant ce type de profil reste toujours un sujet de débat (ce qui signifie sans doute que le supplément de perfo qu'ils sont sensés apporter reste difficilement perceptible). Ainsi dans le petit monde du F3K :

- Certains préconisent l'utilisation d'un stab à courbure positive, dit « porteur » (le Supergee de Marc Drela avec son profil HT 22 en est un excellent exemple).
- D'autres préconisent au contraire un profil à courbure négative (profil : Zone horizontal, sur le planeur Zone de Gerald Taylor)
- Et beaucoup de compétiteurs continuent à faire confiance aux vertus du classique stab à profil symétrique...

Finalement devant tant de positions contradictoires on ne sait plus que croire. Nous allons tenter d'y voir plus clair....

J'ai recensé 4 arguments différents en faveur des stab asymétriques :

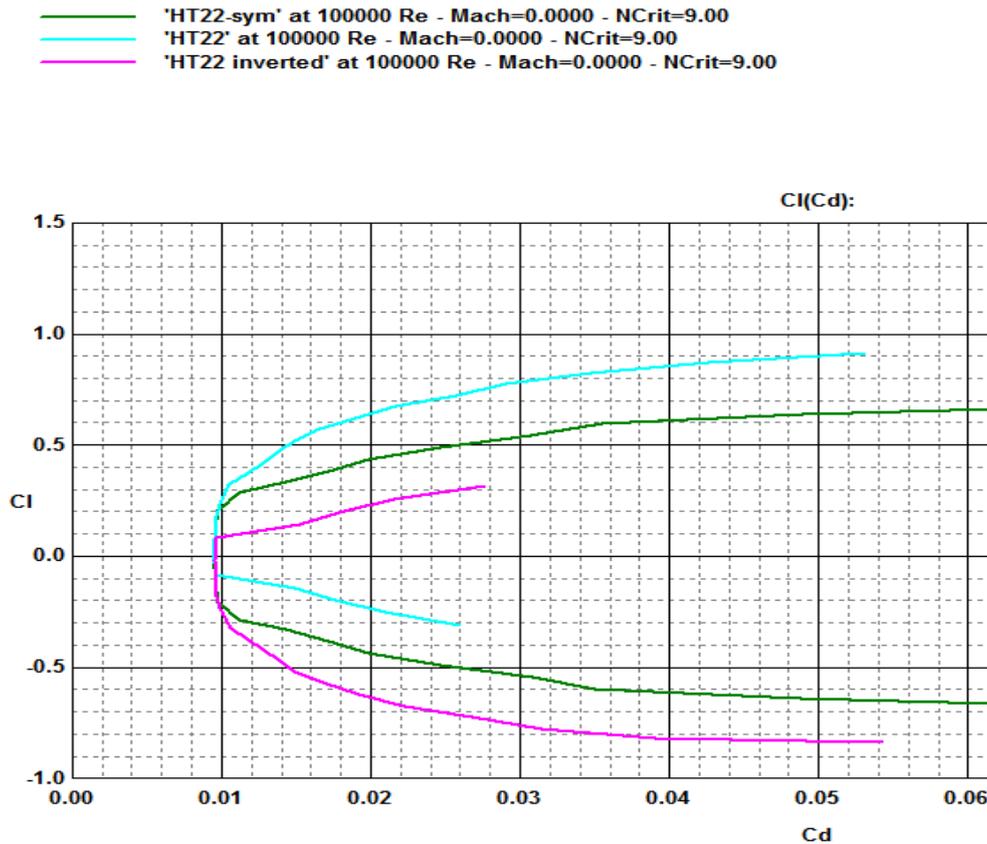
- adapter le profil à la gamme de C_z stab rencontré en vol
- réduire la traînée de braquage (à cabrer) du volet de profondeur.
- tenir compte de la courbure du flux aérodynamique en virage
- tenir compte des transitoires de C_z lors de la mise en virage

Reste à quantifier tout cela pour déterminer lesquels de ces arguments sont réellement valables et évaluer l'ordre de grandeur des améliorations de performances à attendre.

Adaptation au domaine de vol

Adapter le profil à la gamme de C_z de stab rencontrée en vol est l'argument le plus évident en faveur des profils asymétriques.

La courbure du profil joue directement sur la gamme de C_z pour laquelle le stab est parfaitement adapté. En voici quelques exemples :



- le profil HT22 (courbe bleu) est parfaitement adapté à une gamme de C_z allant de $C_z=-0.08$ à $C_z=+0.25$ (pouvant même aller jusqu'à $C_z=+0.4$).
- Si ce stab était inversé (HT22-inverted, courbe rose) la gamme optimale serait bien sûr comprise entre $C_z=+0.08$ à $C_z=-0.25$.
- Ce même profil rendu symétrique (HT22-sym courbe verte) est optimal pour une gamme de C_z allant de $C_z=-0.2$ à $C_z=+0.2$

En définitive la difficulté est de déterminer la gamme de fonctionnement en C_z du stab, ce qui n'est pas si facile.... D'où les nombreuses discussions auxquelles on assiste parfois.

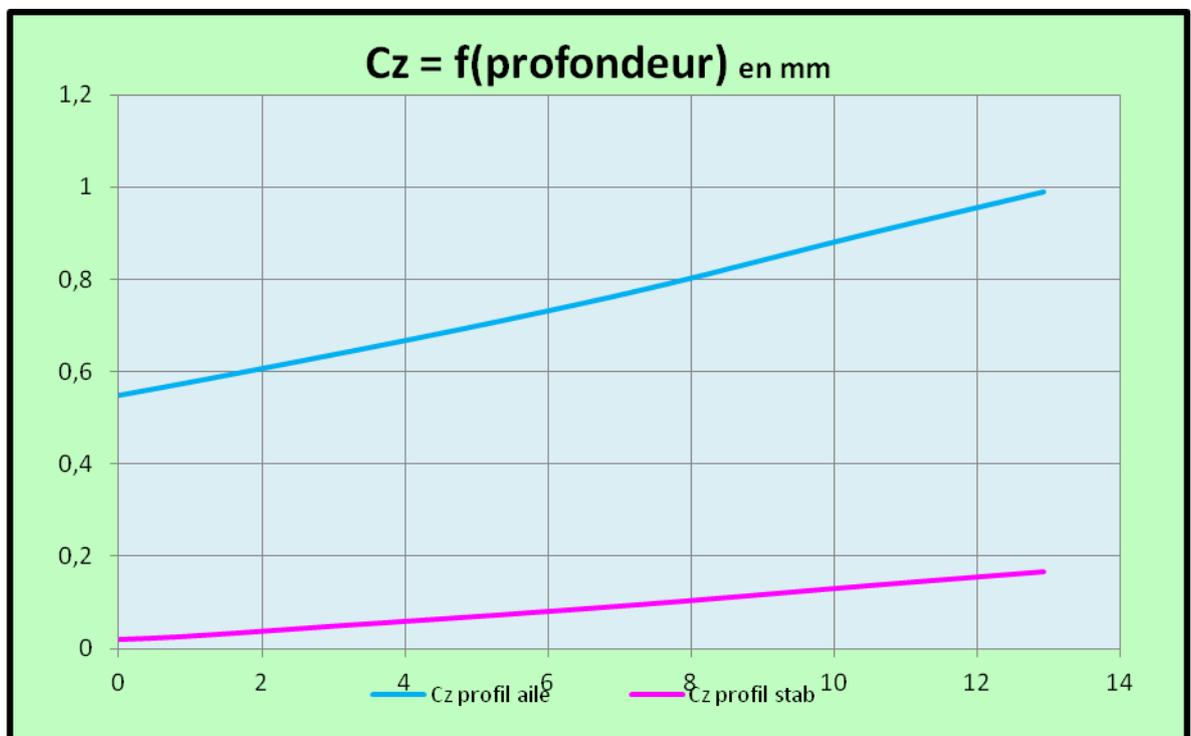
Contrairement à ce que beaucoup de pilotes pensent, le calage du stab par rapport au fuselage ne donne aucune indication fiable sur le caractère porteur ou déporteur du stab (car rien ne dit que le fuselage est à incidence nulle en vol).

Pour se faire une idée du caractère porteur ou déporteur du stab, on peut, soit suivre une démarche expérimentale (mettre un brin de laine sur une petite antenne juste en avant du BA du stab et observer sa position en fonction de la vitesse de vol), soit utiliser la formule suivante pour calculer le C_z .stab:

$$C_{z_s} = \frac{C_{z_{a+f}}}{V_{CG}} \cdot (X_{CG} - X_{a+f}) + \frac{C_{m_0}}{V_{CG}} \quad (\text{voir formule (5) du premier article de cette série})$$

Cette formule a été implémentée dans le fichier « Centrage+Vlongi+ réglages » (voir articles précédents). La mise en œuvre de ce fichier au travers de plusieurs exemples montre que **la gamme de Cz.stab d'un modèle dépend énormément des réglages adoptés par le pilote (centrage et braquage des volets)**. Indépendamment de sa géométrie, un même planeur peut très bien avoir un stab porteur ou au contraire déporteur pour un même point de vol suivant les réglages adoptés. Pour simplifier on retiendra les points suivants :

- En ligne droite et à vitesse élevée (Cz de vol proche de zéro), Cz.stab est a priori toujours négatif. Le stab est déporteur afin de compenser le Cm0 de l'aile : en supposant $C_{z_{a+f}} \approx 0$ la formule ci-dessus se réduit à $C_{z_s} \approx \frac{C_{m_0}}{V_{CG}}$
- Sur un planeur centré neutre ou légèrement avant, Cz.stab augmente rapidement avec le Cz de vol (que le planeur soit en ligne droite ou en virage). Le stab est donc assez fortement porteur en vol lent ou en virage serré. Ceci est d'autant plus vrai que le volume de stab est grand et le Cm0 faible. Cette situation est habituelle sur les planeurs de vitesse F3F/F3B ou 60 pouces, mais elle peut aussi se retrouver sur des planeurs de gratte (voir ci-dessous le cas d'un planeur F3K : le Cz.stab est donné par la courbe rose).

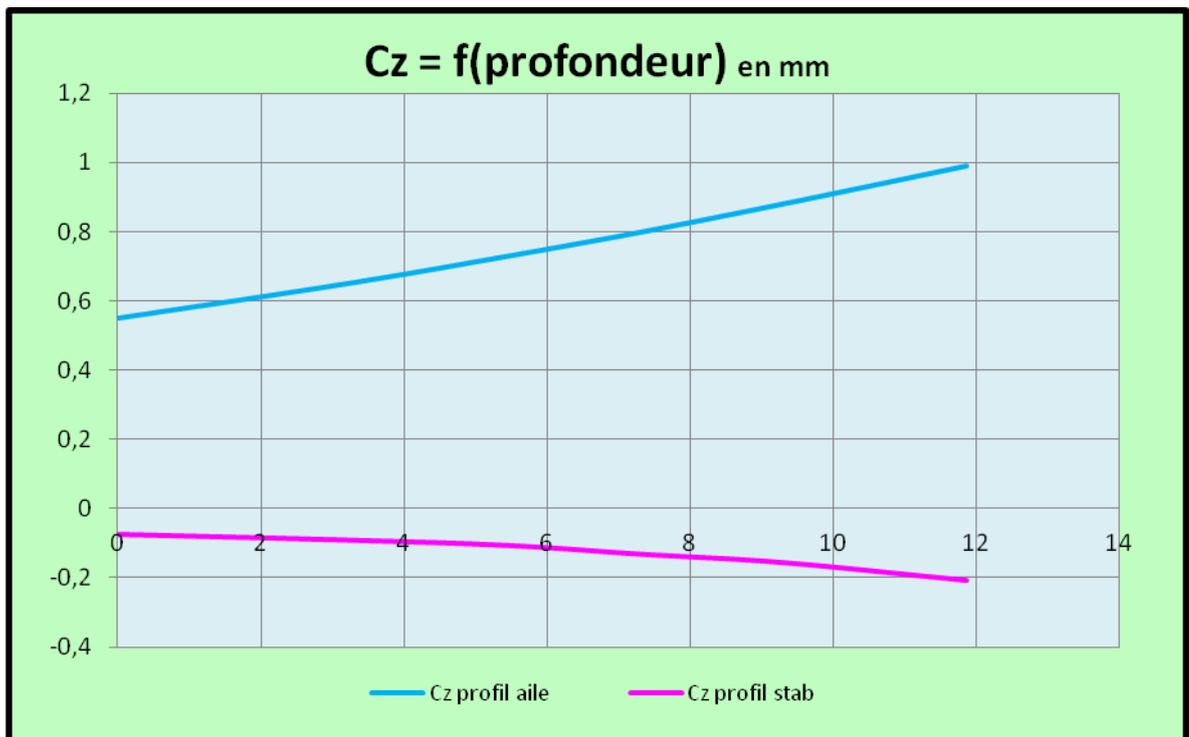


Il s'agit d'un planeur F3K centré avec une marge statique de 5% et volant à 6.6m/s avec les volets baissés de 2°. Dans ces conditions $C_{z.stab}$ varie entre $C_z = +0.02$ en ligne droite et

$C_z = +0.17$ en virage serré.

Les mêmes calculs montrent que $C_{z.stab}$ pourrait atteindre $C_z = +0.33$ en virage serré si le centrage était neutre.

- Mais suivants les réglages adoptés, le stab de ce même F3K peut tout aussi bien rester déporteur même à fort C_z . C'est notamment le cas lorsque le centrage est fortement avant et que les volets sont utilisés avec un braquage relativement important (snapflap). Ceci est d'autant plus vrai que le volume de stab est faible et le C_{m0} important. Cette situation est illustrée dans le graphique ci-dessous



Il s'agit du même planeur F3K, volant à 6.6m/s, mais centré cette fois-ci avec une marge statique de 10% (soit 8.5mm plus avant) et utilisant 4° de snapflap en plus des 2° de volet manche au neutre (soit 6° au total). Dans ces conditions le C_z stab varie de $C_z = -0.07$ en ligne droite à $C_z = -0.2$ en virage serré.

Dans les 2 exemples ci-dessus le nombre de Reynolds correspond à un vol thermique (gratte), $C_{z.stab}$ peut grossièrement varier entre $C_z = 0$ et $C_z = +0.2$ dans le cas n°1, ou entre $C_z = 0$ et $C_z = -0.2$ dans le cas n°2. Dans le cas d'un stab pendulaire on peut donc conclure :

- qu'un stab à courbure positive (profil HT22) est favorable dans le cas n°1
- qu'un stab à courbure inverse (profil HT22-inverted) est favorable dans le cas n°2
- et qu'un stab symétrique (profil HT22- sym) couvre parfaitement les 2 cas de réglage sans aucune perte de performance !

En conclusion la gamme de Cz.stab d'un modèle dépend beaucoup plus des habitudes de réglage du pilote que de la géométrie ou même de la destination de la machine. Voilà qui peut expliquer bien des incompréhensions... !

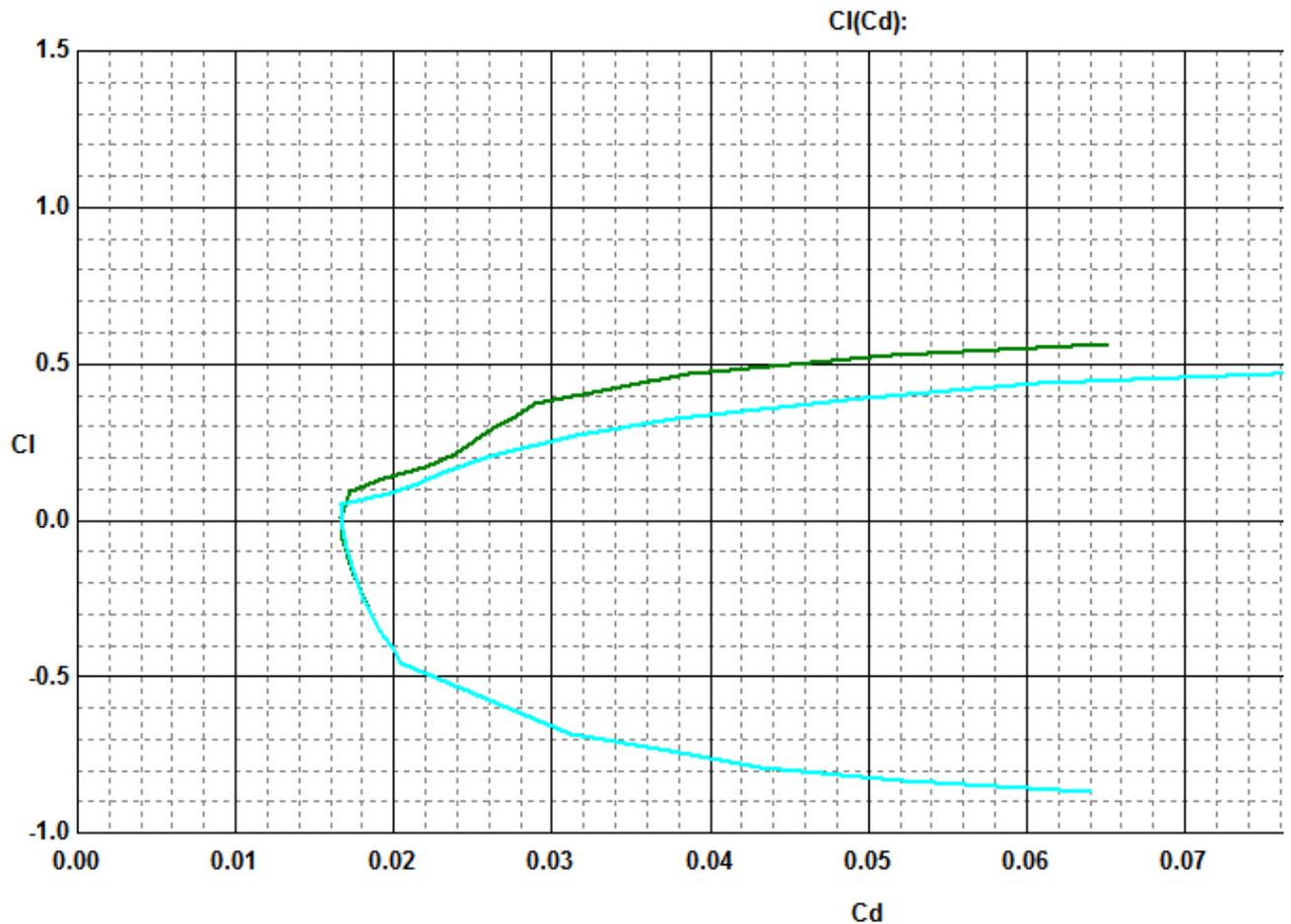
Traînée de braquage

Comme nous venons de le voir, la portance d'un stab est parfois plus élevée en virage qu'en ligne droite (ceci est particulièrement vrai pour les planeurs centrés neutre comme les F3B /F3F ou 60 pouces). Pourtant dans le cas d'un stab à volet, le volet de profondeur est alors braqué en négatif ce qui n'est pas du tout favorable à la portance du stab et génère un supplément de traînée important.

L'utilisation d'un stab à cambrure positive (stab dit « porteur ») permet de réduire cette traînée de braquage : mettre la profondeur à cabrer revient alors (au moins pour les faibles débattements) à corriger la cambrure initiale du profil. Il est ainsi possible de changer l' α_0 du profil en minimisant la traînée de braquage du volet. Ce gain est surtout notable pour les Cz positifs mais il peut aussi exister pour les Cz négatifs. En vérité la réduction de la traînée de braquage du volet constitue la justification la plus convaincante des profils « porteur ».

Le graphique ci-dessous illustre cet avantage, il compare la traînée du profil « porteur » HT22 (courbe verte) avec celle du même profil rendu symétrique (HT22-sym, courbe bleue).

— 'HT22' at 40000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -7.00 degrees, hinged at 30.00%
— 'HT22-sym' at 40000 Re - Mach=0.0000 - NCrit=9.00 - flap defl. -7.00 degrees, hinged at 30.00%



Aux Cz positifs, le profil à courbure positive HT22 (courbe verte traîne moins que le profil symétrique HT22-sym (courbe bleue). Nota : les $\Delta\alpha_0$ sont identiques.

Inversement une courbure négative aurait tendance à augmenter fortement la traînée de braquage (pour un braquage à cabrer). En conséquence il ne faut surtout pas utiliser de profil à courbure inverse sur un stab à volet.

Distorsion du flux aérodynamique en virage

Lors d'une spirale serrée, le stab voit un flux aérodynamique courbe (l'aile aussi d'ailleurs...). Si le profil est symétrique tout se passe alors comme si celui-ci avait une

courbure légèrement positive. Dans le cas d'un stab pendulaire, si cette courbure aérodynamique est compensée par une courbure inverse du stab celui-ci se comporte alors comme un stab symétrique.

Une petite étude géométrique montre que la courbure aérodynamique a pour valeur :

$$c\% \approx \frac{C}{8R} \cdot \cos \varphi$$

La courbure aérodynamique $c\%$ est donc très faible même dans le cas d'une spirale très serrée ($c\% = 0.20\%$ dans le cas d'un F3K en virage à 55° d'inclinaison avec un rayon de 3m et un stab de 60 mm de corde moyenne!).

En vérité, ce phénomène n'est pas forcément pénalisant :

- Il est défavorable au fonctionnement du stab si celui-ci est déporteur en virage serré (planeur centré très avant et braquage volet important). Une courbure inverse du stab pourrait alors corriger cet effet.
- Il est au contraire favorable au fonctionnement du stab si celui-ci est porteur en virage serré (planeur centré neutre ou braquage volet faible), la courbure aérodynamique rend le stab « porteur »

Les simulations de courbure sur Xfoil montrent que ce phénomène n'a dans tous les cas qu'une influence extrêmement marginale sur la perfo.

Nota : Avec un stab à volet on peut estimer que ce phénomène n'intervient pas car le braquage du volet en virage modifie de façon naturelle la cambrure du profil dans le bon sens.

Transitoire de mise en virage

Je cite ce point car il est mis en avant par Gérard Taylor pour justifier le choix d'une courbure inverse pour son profil Zone Horizontal. Mais cet argument ne me semble pas pertinent.

Dans le cas d'un stab pendulaire il existe effectivement un transitoire sur le C_z de stab à chaque fois que l'on touche à la profondeur (nous reviendrons en détail sur cet aspect lors de l'étude de la dynamique longitudinale). Pour faire simple, imaginons un planeur à stab pendulaire dont le C_z .stab en ligne droite vaut $C_z = -0.1$ et le C_z .stab en virage serré $C_z = +0.3$. Juste avant la mise en virage le stab est à $C_z = -0.1$, il devient brusquement encore plus déporteur au moment où le pilote tire sur la profondeur. Puis au fur et à mesure que le planeur atteint sa vitesse de tangage le C_z .stab rejoint progressivement sa valeur d'équilibre en virage, soit C_z .stab = $+0.3$. En réalité le tout ne dure au maximum que quelques dizaines de millisecondes.

L'amplitude du transitoire en C_z dépend de l'inertie du planeur et de son amortissement longitudinal ainsi que de la vitesse de déplacement du servo de profondeur. Mais le paramètre principal est la vitesse du planeur : au plus le planeur est lent au plus le transitoire est important. Un profil à courbure inverse serait alors favorable car il présente moins de traînée aux forts C_z négatifs.

Pourtant à mon sens ce type de transitoire ne constitue pas vraiment un argument en faveur des profils asymétriques. En effet, si le transitoire est négatif lors de la mise en virage,

il est, à l'inverse, positif lors de la sortie de virage. Dans ces conditions ajouter de la courbure au profil ferait perdre à la sortie de virage ce que l'on a gagné à la mise en virage...

En conséquence la seule précaution à prendre vis-à-vis des transitoires dynamiques consiste à choisir un profil ayant une marge suffisante par rapport au $Cz.stab$ extrêmes (positifs et négatifs) rencontrés pendant le vol. La marge à prendre doit être a priori d'autant plus grande que le planeur vole lentement et que le servo profondeur est rapide, ce qui augmente l'amplitude et la durée du transitoire. Cette précaution ne concerne que les stab pendulaires car dans le cas d'un stab à volet le braquage du volet modifie la courbure du profil dans le bon sens et donne naturellement la marge en Cz qui va bien.

Conclusions :

On retiendra essentiellement les points suivants :

- L'utilisation d'un profil asymétrique n'apporte dans le meilleur des cas qu'un gain très faible sur la performance pure du planeur
- Le gain éventuel dépend essentiellement de la gamme de $Cz.stab$ et donc des réglages adoptés par le pilote (centrage et utilisation des volets).
- Dans le cas d'un planeur de voltige (qui doit voler aussi bien en positif sur le ventre, qu'en négatif sur le dos), il est vivement recommandé d'adopter systématiquement un profil symétrique (et un volume de stab optimal)
- Pour un planeur ayant un domaine de vol principalement positif (F3B, F3F, F3J, F3K, 60 pouces), l'utilisation d'un stab à profil asymétrique n'a d'intérêt que dans les cas suivants :
 - Sur un stab à volet pour réduire la traînée de braquage du volet. Dans ce cas le profil sera toujours à courbure positive (profil « porteur »). Le gain est plus sensible si le $Cz.stab$ est positif (centrage neutre ou faiblement avant, ce qui est généralement le cas sur des planeurs F3B/F3F/60 pouces)
 - Beaucoup plus marginalement dans le cas d'un stab pendulaire, pour adapter le profil au domaine de $Cz.stab$ rencontré en vol :
 - Profil à courbure positive si le domaine en $Cz.stab$ est plutôt positif (ce qui correspond généralement à un centrage neutre ou faiblement avant, c'est a priori le cas des planeurs F3B/F3F/60 pouces)
 - Profil à courbure négative si le domaine en $Cz.stab$ est plutôt négatif (centrage fortement avant et fort braquage des volets, ce qui peut éventuellement être le cas sur des planeurs F3J/F3K)
 - Lorsque l'on ne connaît pas parfaitement le domaine à couvrir en $Cz.stab$, un profil symétrique reste le choix le plus sûr (car il y a plus à perdre qu'à gagner en cas d'erreur...)

- Pour un stab à volet, une cambrure négative est à proscrire dans tous les cas car la traînée de braquage est alors importante.

Finalement on retrouve les justifications de solutions éprouvées par nombre de pilotes F3K :

- Le Supergee possède un stab à volet : un profil « porteur » comme HT22 est dans ce cas un meilleur choix qu'un stab symétrique, notamment lorsque le CG n'est pas trop avant ($M\% < 6\%$) et que l'on ne met pas trop de volet
- Le planeur Zone possède un stab pendulaire : le profil « déporteur » Zone-Horizontal pourra apporter un très léger avantage (au moins psychologique) par rapport à un profil symétrique à condition que le centrage du planeur soit très avant et que l'on utilise beaucoup de volet (de l'ordre de 6°) en spirale
- Et dans tous les cas un stab pendulaire à profil symétrique est une solution performante qui a au moins le mérite d'éviter de se tromper sur le sens de la courbure à adopter en fonction des réglages du planeur !

3) Critères de choix d'un profil de stab

Comme toujours le choix d'un profil passe d'abord par l'analyse du domaine à couvrir en termes de C_z et de nombre de Reynolds. Il faut ensuite analyser les performances des profils candidats suivant plusieurs critères, dans le cas d'un profil de stab les critères à prendre en compte sont les suivants :

Cz+ et Cz-

Il s'agit du C_z maximum que peut supporter le profil en positif et en négatif. Dans le tableau cette valeur est arbitrairement définie comme étant le C_z pour lequel le C_x est 3 fois plus grand que le C_x min de la polaire.

Pour éviter que le stab ne décroche avant l'aile il convient de vérifier que le profil stab est compatible du C_z .stab max attendu dans l'ensemble du domaine de vol, en positif comme en négatif :

- Dans le cas d'un stab à volet C_{z+} et C_{z-} doivent être légèrement inférieurs au C_z max du stab (en positif et en négatif)
- Dans le cas d'un stab pendulaire la marge par rapport au décrochage doit être plus importante. Il est en effet nécessaire de tenir compte du comportement transitoire propre au stab pendulaire lors des mise en virage et des sorties de virage (brève augmentation d'incidence et donc du C_z .stab). En conséquence C_{z+} et C_{z-} doivent présenter une marge par rapport au C_z max du stab. Nous reviendrons sur cet aspect dans un prochain article consacré à l'étude du comportement dynamique longitudinal.

Cx

Le deuxième aspect auquel on s'intéressera est bien sûr la traînée du profil. Comme toujours le Cx est à analyser pour différents points de vol :

- En ligne droite, dans l'ensemble de la gamme de vitesse prévue pour le planeur
- En virage. Dans le cas d'un stab à volet il convient alors d'évaluer le Cx en tenant compte du braquage du volet de profondeur.

Efficacité

Le troisième paramètre à analyser est l'efficacité du volet de profondeur.

(Voir chapitre ci-dessus concernant la comparaison des performances des stab à volet)

4) Fichier de synthèse

Le fichier de synthèse « Profils Stab » comporte 2 tableaux différents : un tableau adapté au choix d'un profil pour stab pendulaire et un tableau adapté au cas des stab à volet. Comme nous venons de le voir, suivant le type de stab envisagé, les caractéristiques à prendre en considération ne sont pas exactement les mêmes.

Dans chacun des 2 tableaux les paramètres sont donnés pour 3 valeurs de Reynolds différentes (choisies de manière plus ou moins arbitraire) :

- $Re = 40K$ (plutôt représentatif d'un stab F3K en vol, voire d'un F3J à V_{zmin})
- $Re = 100K$ (plutôt représentatif d'un stab F3B/F3F en vol de durée ou d'un F3J en finesse max)
- $Re = 250K$ (plutôt représentatif d'un stab F3F en course ou d'un grand planeur en vol de pente, ou encore d'un F3K au lancé)

Dans le cas d'un stab pendulaire les paramètres présentés sont :

- C_x à $C_z = 0$
- C_x à $C_z = -0.1$
- C_x à $C_z = +0.3$
- C_{z+} et C_{z-} (voir plus haut)

Dans le cas d'un stab à volet le tableau donne la valeur du C_x à $C_z = 0$ pour un volet au neutre, ainsi que les paramètres correspondant à un volet de 30% de la corde braqué à -6° (cabré) :

- Efficacité du volet
- C_x à $C_z = -0.1$ et à $C_z = +0.3$
- C_{z+}

Les profils sont classés par épaisseur en 3 grandes catégories :

- Les profils de 9% d'épaisseur : ils possèdent une bonne tolérance aux forts C_z positifs comme négatifs et sont plutôt destinés aux grands planeurs ou aux planeurs de voltige

(profil aile de forte épaisseur). Pour ce type d'utilisation les paramètres à $Re=40k$ sont peu représentatifs.

- Les profils de 7% à 8% d'épaisseur plutôt destinés aux planeurs type F3B/F3F/F3J
- Les profils de 6% ou moins plutôt destinés aux petits planeurs 60 pouces et F3K

Un code couleur facilite la visualisation des performances relatives des différents profils à l'intérieur de chacune des 3 familles

- Vert : les meilleures perfo de la famille
- Vert clair : perfo standard
- Orange : les moins bonnes perfo de la famille
- Rouge : perfo médiocres pouvant éventuellement pénaliser le modèle dans certaines conditions

Tous les profils présentés dans ce tableau sont des profils éprouvés, leurs performances intrinsèques n'ont a priori que peu de répercussion sur les performances globales des modèles. Quelques cases orange ne signifient pas du tout que les performances globales du planeur seront pénalisées de façon perceptible. Seules les caractéristiques présentées dans les cases rouges peuvent éventuellement s'avérer pénalisantes dans certaines configurations particulières qu'il conviendra d'éviter (voir la case commentaires).

5) Panorama des profils de stab

Profils « grands planeurs »

NACA0009/NACA0008 : Il y a moins d'une vingtaine d'année les profils NACA étaient les seuls vrais profils à être utilisés sur les stab de nos planeurs (si on excepte les profils « planche »). X-foil semblant montrer que ces profils sont mal adaptés aux faibles Reynolds (C_x important, mauvaise efficacité de volet, distorsion des polaires $C_z=f(\alpha), \dots$), de nouveaux profils sont apparus depuis.

TP29-9% a été conçu comme profil de stab pour améliorer le fonctionnement à faible Reynolds et augmenter l'efficacité du volet ainsi que la tolérance en C_z max. Ce profil est un excellent choix pour un planeur de voltige, particulièrement en VTPR

TP 42 est une évolution de TP29 destinée à améliorer les performances aux Re élevés. On pourra donc l'utiliser sur des stab de grande corde, ou encore à l'emplanture en combinaison avec TP29 au saumon.

Profils F3B/F3F/F3J

S8025 a longtemps été une référence en F3B, son excellente tenue au forts Cz positifs permet de positionner le crochet légèrement plus en arrière au treuillage (est-ce un avantage ?). Par contre en contrepartie l'efficacité du volet aux faibles Reynolds ($Re < 200k$) est un peu faible.

HD801 : c'est un profil très à la mode sur les planeurs F3B/F3F. A mon goût l'efficacité du volet de profondeur est également un peu faible surtout à faible Reynolds. Il faut donc plus de battement qu'avec TP29-7% pour faire le même virage d'où plus de traînée de braquage. Les Cz max ne sont pas non plus très élevés.

E478 : à l'origine ce profil Eppler fait 16% d'épaisseur. Il a récemment été employé avec une épaisseur réduite à 7 ou 8% sur des planeurs F3B/F3. Ces caractéristiques sont assez proches de celles de HD801

TP29-8% ou **TP29-7%** : Ces profils ont été développés pour l'Alliaj d'Aéromod. Par rapport aux profils classiques comme S8025 ou HD801 ils apportent un gain appréciable en termes d'efficacité de volet et de C_x mini. Le C_z max est assez élevé ce qui en fait un profil beaucoup plus tolérant que HD801 aux différents réglages possibles lors du treuillage. TP29-8% est également utilisé sur l'Alliaj HM et le Predator2. Sa grande tolérance y compris aux faibles Reynolds en fait un profil également bien adapté au F3J

HT14 : Ce profil est plutôt adapté aux faibles Reynolds. A ce titre il convient très bien aux planeurs F3J. L'efficacité du volet est excellente.

TPstab F3F : avec ce profil j'ai sacrifié à la tentation du profil asymétrique ! La courbure reste cependant très raisonnable. Plutôt destiné aux stab à volet, ses caractéristiques (C_x mini, efficacité volet, C_z +) semblent en faire le meilleur profil de sa catégorie.

Profils 60 pouces/F3K

HT08 : profil très utilisé en F3K mais déjà un peu dépassé

HT12 : très proche de HT08 mais avec de meilleures perfo. Curieusement il semble moins utilisé que son petit camarade. Effet de mode ?

HT22 : profil asymétrique dit « porteur ». Sa courbure dépasse 1% et en conséquence il vaut mieux l'utiliser dans le bon sens ! (ce qui pour un stab pendulaire dépend essentiellement des réglages adoptés par le pilote)

Avec un volet à 60% de la corde il est aussi performant qu'en stab pendulaire jusqu'à 6° de braquage. Personnellement je trouve la cambrure un peu trop forte (plus de 1%) si bien qu'à fort Reynolds ($Re > 200K$) ce profil manque un peu de tolérance aux Cz légèrement négatifs, si le profil n'est pas bien respecté ceci peut être un handicap lors du lancé.

Zone-Horizontal : profil de très faible épaisseur (4.29%) à courbure inverse. C'est un profil très performant mais qui demande impérativement à être utilisé sur un stab pendulaire et de préférence avec des réglages assurant un Cz.stab nul ou négatif pour espérer percevoir un gain. Sa très faible épaisseur relative fait qu'un bon respect est nécessaire pour obtenir les perfo attendues

Freak-Horizontal : La toute dernière création de Gerald Taylor. Conçu pour les stab à volet en F3K. Dans cette utilisation c'est de loin le profil le plus performant à faible Reynolds (gratte et spirale). Avec 60% de corde de volet il est aussi performant que s'il était utilisé en pendulaire (jusqu'à des braquages de 8°). Malheureusement la cambrure (1.3%) est encore plus importante que sur HT22, si bien qu'au au lancé il présente 20 à 25% de traînée supplémentaire par rapport à des profils comme Zone-Horizontal ou TPstab-60 (ce qui est sans doute négligeable, mais quand même...)

TP29-5% : réduit à 5% d'épaisseur TP29 conserve d'excellentes performances. Plus performant que le classique HT08, il apparaît également meilleur que HT12. C'est le profil à choisir pour un stab pendulaire quand on n'a aucune idée de la gamme de Cz.stab à couvrir.

TP stab 60 : initialement conçu pour le 60 pouces, ce profil devrait aussi donner entière satisfaction en F3K. C'est un profil légèrement asymétrique (courbure positive de 0.39%). Il est aussi performant en Cx que Zone horizontal mais son épaisseur de 5% le rend à la fois plus facile à respecter et plus tolérant. En 60 pouces on l'utilisera de préférence dans le sens porteur sur un stab à volet (corde 30%), il est alors aussi performant qu'en stab pendulaire. En F3K, il est conseillé en stab pendulaire soit dans le sens porteur soit dans le sens déporteur (suivant la gamme de Cz.stab à couvrir en fonction des réglages adoptés par le pilote), si on l'utilise en stab à volet (corde 60%) il sera aussi performant qu'en stab pendulaire jusqu'à 5° de braquage et il devrait être meilleur que HT22 notamment au lancer. Peut-être le meilleur de sa catégorie ?

Planche 3% : certes ce n'est ni le profil le plus « technique » ni le plus performant, mais ce n'est pas non plus une catastrophe. Rappel : en virage, 20% de traînée en plus sur le stab c'est moins de 1% de supplément sur la traînée globale du planeur (donc ce n'est pas vraiment mesurable). Utilisable en stab pendulaire ou stab à volet si Cz.stab ne dépasse pas 0.3 à 0.35