

STAB PENDULAIRE OU STAB A VOLET ?

Lors de la conception d'un planeur il est possible d'opter soit pour un stab à volet, soit pour un stab pendulaire. Ces 2 solutions sont classiques et les critères de choix reposent bien souvent sur le feeling :

- on imagine facilement qu'un stab pendulaire génère a priori moins de traînée qu'un stab de dimensions identique dont il faut braquer le volet
- mais en contrepartie le stab à volet est réputé plus « efficace » et plus précis

Pour pouvoir faire un choix sur des critères parfaitement objectifs nous allons tenter de quantifier le delta de traînée lié au braquage du volet.

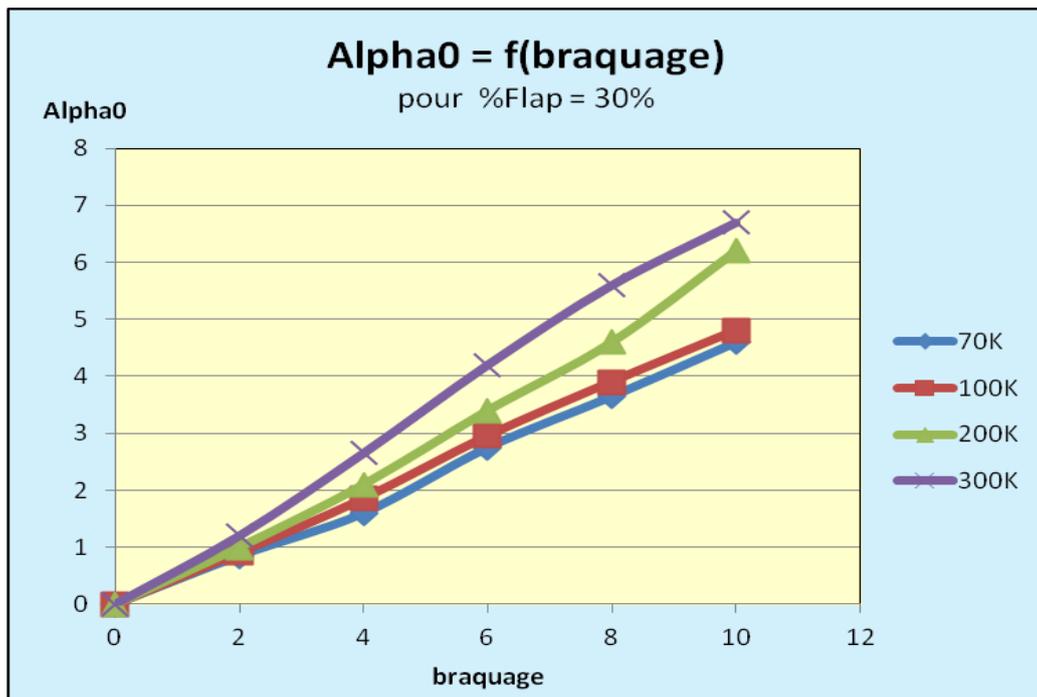
Stab pendulaire / Stab à volet : comparaison des débattements

Dans le cas d'un stab pendulaire les calculs de braquage profondeur se font simplement en assimilant le braquage du stab à une variation ΔV_{longi} du V longitudinal (voir article sur le Vlongitudinal).

Pour un stab à volet, le calcul du braquage du volet peut se déduire du calcul précédent en assimilant les changements d' α_0 (angle d'incidence à portance nulle) dues au braquage du volet de profondeur aux changements de Vlongi.

L'étude, à l'aide d'Xfoil, des variations d' α_0 en fonction du braquage volet $\Delta \gamma$ et de la dimension relative du volet %*Flap* fait apparaître les 2 points suivants :

- La relation entre l'angle d'incidence à portance nulle α_0 et le braquage $\Delta \gamma$ est pratiquement linéaire. Voir graphique ci-dessous dans le cas du profil TP29-8% : les valeurs d' α_0 ont été directement relevés sur les polaires $C_z=f(\alpha)$ issues de Profili pour différents braquage de gouverne et différent Re.

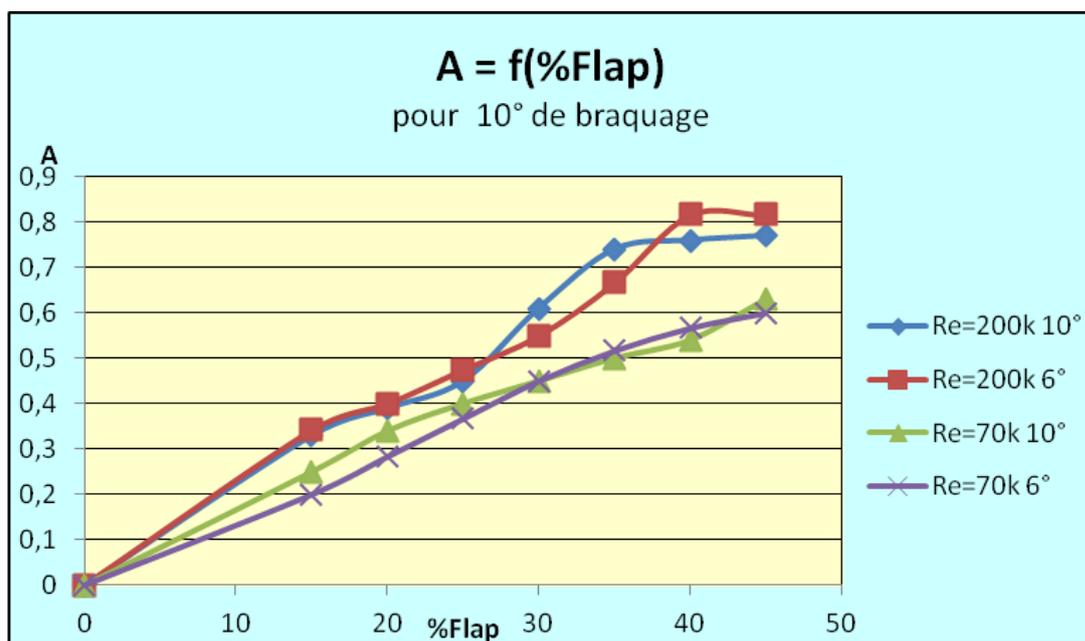


On a donc : $\Delta V_{longi} = \Delta \alpha_0 \approx A \cdot \Delta \gamma$

Où A est le coefficient d'efficacité du volet de stab (pente de la droite $\alpha_0 = f(\Delta \lambda)$)

La valeur du coefficient A dépend de la profondeur du volet %Flap et du nombre de Reynolds. Il dépend aussi du profil (en particulier aux faibles Reynolds).

- Le tracé des courbes $A = f(\%Flap)$ montre qu'en première approximation le coefficient A est proportionnel à la dimension relative du volet %Flap (voir graphique ci-dessous pour le profil TP29-8%) :



On peut donc écrire :

$A \approx a * \%Flap$ où a dépend légèrement du Nombre de Reynolds

On a $a \approx 1.5$ pour $Re=80000$ et $a \approx 1.8$ pour $Re=200000$

Ainsi le coefficient d'efficacité d'un stab fonctionnant à $Re=80k$ avec un volet à 30% vaut approximativement : $A = 1.5 * 0.30 = 0.45$

Débattement d'un stab à volet

Du fait de la relation linéaire entre A et $\%Flap$ la dimension du volet disparaît lorsque l'on convertit l'angle de braquage volet en un déplacement dM en mm. Pour des angles de braquage pas trop élevés ($< 10^\circ$) et en prenant comme coefficient moyen $a \approx 1.67$, on a effectivement :

$$dM_{volet} \approx \Delta\gamma.\%Flap.C = \frac{\Delta V_{longi}}{a.\%Flap}.\%Flap.C = \frac{\Delta V_{longi}}{a}.C \approx \Delta V_{longi} * 0.6C$$

Pour une efficacité donnée (ΔV_{longi}), le débattement en mm d'une profondeur à volet ne dépend pratiquement pas de la dimension de la corde du volet.

Que le volet de profondeur fasse 20% de la corde ou 40% de la corde, il faut toujours à peu près le même déplacement en mm pour un même comportement du planeur.

Débattement d'un stab pendulaire

Pour limiter le couple sur le servo de profondeur l'axe d'un stab pendulaire est généralement positionné légèrement en avant du foyer du stab (soit 25% de la CAM). En supposant un stab sans flèche avec un axe situé à 22% de la corde moyenne, le débattement vaut environ :

$$dM_{pendulaire} \approx \Delta V_{longi} * (1 - 0.22)C = 0.78 * C * \Delta V_{longi}$$

Pour une même efficacité, un stab pendulaire nécessite généralement un peu plus de débattement qu'un stab à volet de géométrie identique. La réputation d'efficacité du stab à volet vient très certainement de ce constat, cependant cette « efficacité » n'a aucun effet réel sur les performances ou les qualités de vol du planeur.

Nota : Le coefficient 0.78 dépend de la position exacte de l'axe de rotation du stab sur la corde d'emplanture. En présence d'une flèche sur le stab, l'axe toujours positionné vers 22% de la corde aérodynamique moyenne, se trouve reculé sur la corde d'emplanture. Le coefficient 0.78 est alors réduit et l'écart de débattement entre un stab à volet et un stab pendulaire est un peu moins important.

Stab pendulaire / Stab à volet : comparaison des traînées

Voici la démarche à suivre pour comparer approximativement la traînée d'un stab à volet avec celle d'un stab pendulaire. Les évaluations sont faites pour une vitesse donnée (ou un C_z en ligne droite C_{z_e} donné) et pour un C_z .profil de l'aile (ou une inclinaison en virage) donné.

- A partir de la vitesse de vol en déduire le Reynolds de stab ainsi que C_{z_e} , le C_z de référence pour un vol stabilisé en ligne droite (ou inversement déduire la vitesse V du C_z de référence C_{z_e}).

$$Re = 70.V.C \quad \text{et} \quad C_{z_e} = \frac{R_0 \cdot g}{V^2} \quad \text{avec} \quad R_0 = \frac{2}{\rho} * \frac{m}{S}$$

- Choisir le C_z .profil aile (ou le déduire de l'angle d'inclinaison en virage φ) et la marge statique pour lesquels ont veut faire le calcul, et à l'aide du fichier **Centrage +Vstab** déterminer le C_z .profil stab correspondant.
- A l'aide des formules suivantes (sur lesquelles nous reviendrons dans un autre article), calculer, dans le cas d'un stab pendulaire, le braquage ΔV_{longi} nécessaire pour réaliser le virage au C_z .profil aile choisi ci-dessus:

$$\Delta V_{longi} \approx \left(\frac{L}{R_0} \left(1 + \frac{C_{z_e}}{C_z} \right) + \frac{M\%}{V_{CG} \cdot A_s} \right) \cdot (C_z - C_{z_e})$$

$$\text{avec} \quad C_z = C_{z.\text{profil.aile}} \cdot \frac{\lambda_a}{\lambda_a + 2} \quad \text{et} \quad \cos\varphi = \frac{C_{z_e}}{C_z} \quad (\text{où } \varphi \text{ est l'inclinaison en virage})$$

$$dM = \Delta V_{longi} \cdot 0.78 * C$$

- Pour passer au cas d'un stab à volet, déterminer le coefficient A en fonction de la profondeur du volet et en déduire le braquage du volet de profondeur

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta V_{longi}}{A} = \frac{\Delta V_{longi}}{a.\%Flap}$$

$$dM = \Delta\gamma.\%Flap.C = \frac{\Delta V_{longi}}{a} . C$$

- Tracer les polaires du profil stab en lisse et pour le braquage $\Delta\gamma$ de la profondeur (volet à cabrer donc braquage négatif). Lire sur chacune des 2 polaires les C_x correspondant à la valeur C_z .profil stab déterminée plus haut.

Remarque : Les formules ci-dessus sont données pour des angles en radians. Si on convertit l'angle de braquage en un débattement en mm, on montre que la valeur obtenue est indépendante de la dimension du volet profondeur $\%Flap$.

$$dM = \Delta\gamma.\%Flap.C = \frac{\Delta V_{longi}}{a.\%Flap} . \%Flap.C = \frac{\Delta V_{longi}}{a} . C$$

Quelques exemples

Voici à titre d'exemple les résultats obtenus avec 2 planeurs différents : un planeur de voltige VTPR et un planeur F3K. Dans chaque cas on compare la traînée d'un stab pendulaire avec la traînée d'un stab à volet (30% de la corde). Les 2 types de stab sont supposés avoir la même géométrie et les mêmes profils.

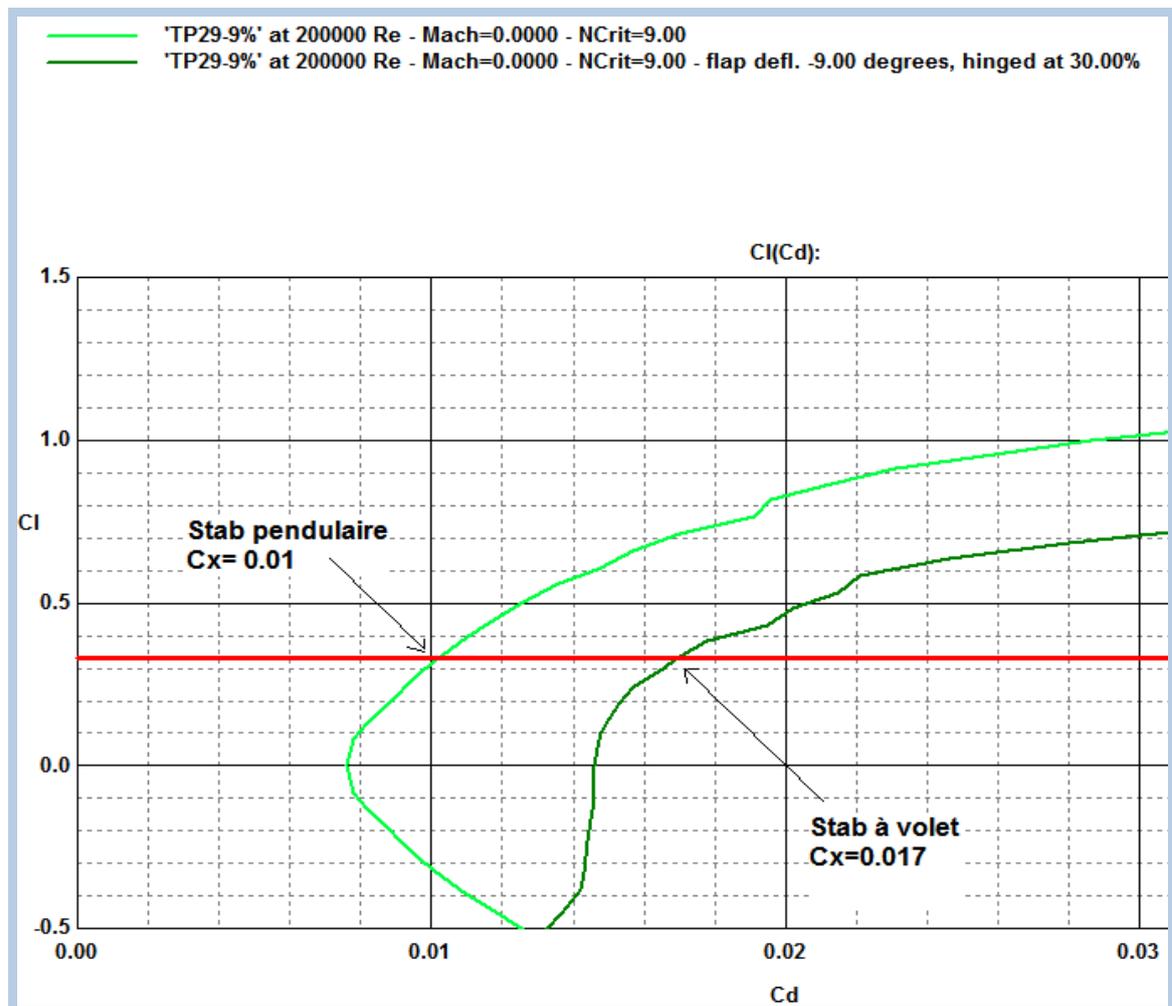
Planeur VTPR de 2m d'envergure :

- profil SB96V /SB96VS utilisé sans volets
- Charge alaire : 35g/dm²
- Volume de stab : 0.45, bras de levier 0.72m
- Centrage neutre
- profil stab TP29-9%

Pour un planeur de ce type les calculs montrent que le C_z stab peut atteindre 0.32 à C_z .profil aile =0.9, et que pour un virage à ce C_z (virage serré type « f3f »), le braquage du stab à volet peut atteindre 9° à 11° (4° à 5° pour le stab pendulaire).

Les polaires ci-dessous permettent de comparer la traînée du stab pendulaire avec celle du stab à volet (volet = 30%).





Analyse : dans le cas de ce planeur VTPR, le stab à volet génère au minimum 70% de traînée de plus que le stab pendulaire lors d'un virage serré !!!
 Il n'y a aucun doute : pour ce type de planeur le stab pendulaire est nettement plus performant.

Nota : la surface du stab étant généralement de l'ordre de 10% de la surface de l'aile et en tenant compte de la dérive et du fuselage, on peut estimer qu'à fort C_z la traînée du stab représente moins de 5% de la traînée totale du planeur.

En conséquence, le gain pourtant très important (70%) sur la traînée du stab en virage serré ne se traduit au mieux que par un gain de l'ordre de 3.5% sur la traînée totale du planeur en virage. Dans la pratique ce gain sera difficile à percevoir mais les petits ruisseaux faisant les grandes rivières...il serait idiot de s'en priver !

Planeur F3K type Supergee

Profil AG455 utilisé avec les volets

Centrage : marge statique de 3% à 6%

Charge alaire 13g/dm²

Volume de stab 0.43, bras de levier 0.7m

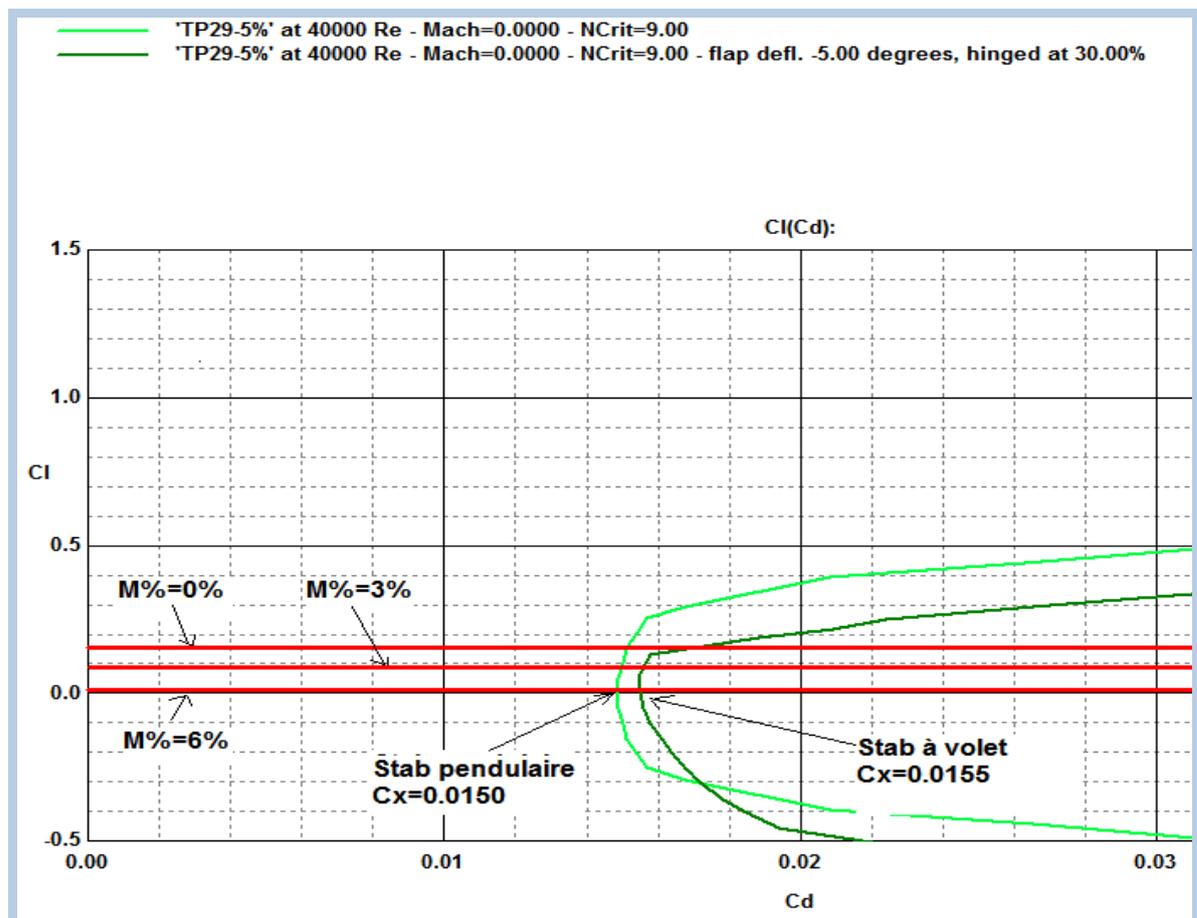
Profil stab TP29-5%



Les calculs montrent qu'en spirale à $V = 6.7\text{m/s}$ ($C_{ze} = 0.47$ et $Re_{\text{stab}} = 40000$), 45° d'inclinaison (ce qui donne $C_{z,\text{profil}} = 0.8$) et 3° de volet, le C_z de stab vaut (nota : en cas d'utilisation des volets le calcul du débattement profondeur est légèrement plus complexe, il sera présenté dans un prochain article):

- $C_z = 0.16$ pour une marge statique nulle ($M\% = 0\%$, centrage neutre)
- $C_z = 0.09$ pour une marge statique $M\% = 3\%$
- $C_z = 0,01$ pour une marge statique $M\% = 6\%$

Dans ces conditions le braquage profondeur du stab à volet est de l'ordre de 4° à 5° suivant le centrage. Les polaires ci-dessous permettent de comparer la traînée du stab pendulaire avec celle du stab à volet.



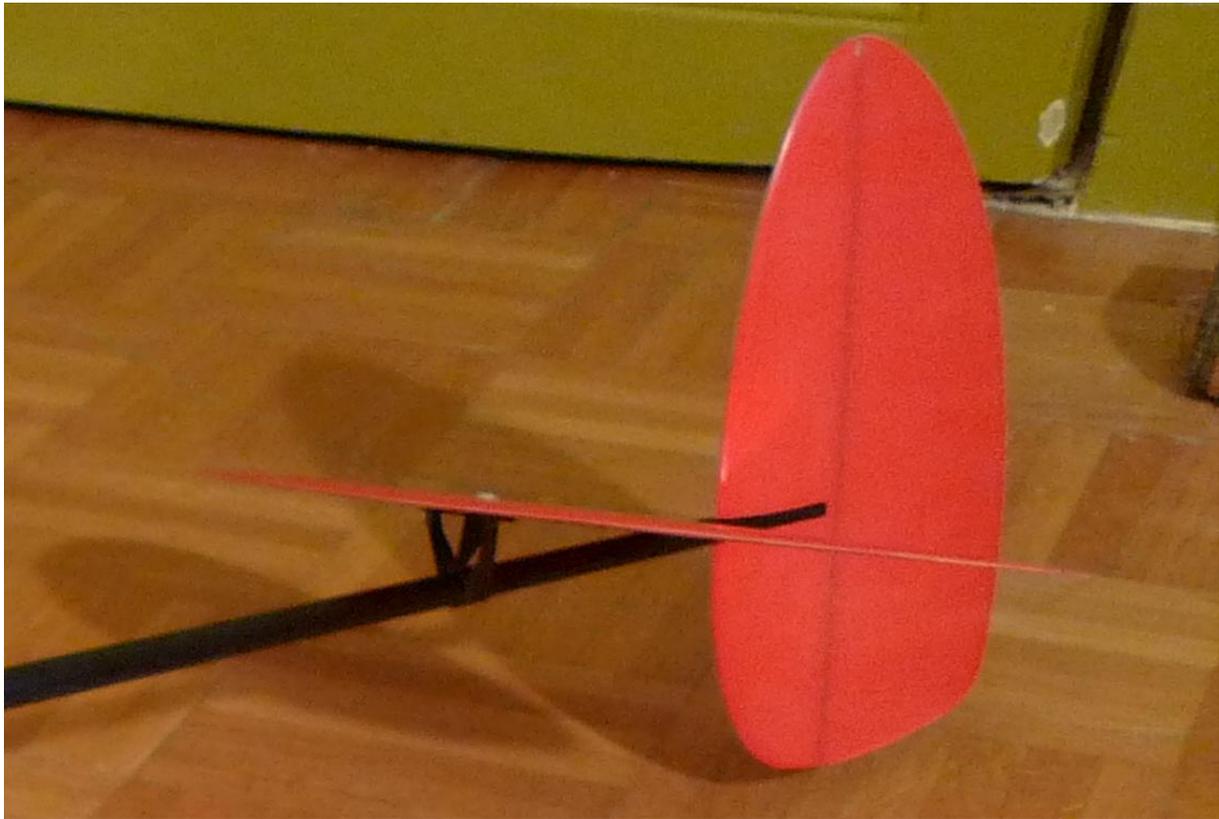
Analyse : Pour ce planeur F3K, le stab pendulaire s'avère là encore le plus performant. Cependant, du fait de l'utilisation des volets et d'un centrage a priori assez avant, la différence de traînée (pour une spirale à 45°) entre les 2 solutions est nettement plus faible que dans le cas précédent :

- 11% pour un centrage neutre $M\%=0\%$ (a priori peu utilisé dans cette discipline ?)
- 3.5% pour un centrage à $M\%=3\%$ ou $M\%=6\%$

Compte tenu de la faible cotisation du stab à la traînée globale du planeur, une différence aussi faible (3.5%) pourra être considérée comme tout à fait négligeable (moins de 0.2% de la traînée globale).

Ainsi donc sur un planeur F3K et dans des conditions de vol normales (inclinaison inférieure à 45°) les 2 types de stab peuvent être considérés comme pratiquement équivalents (la différence serait sans doute plus significative pour des spirales serrées au-delà de 45° d'inclinaison).

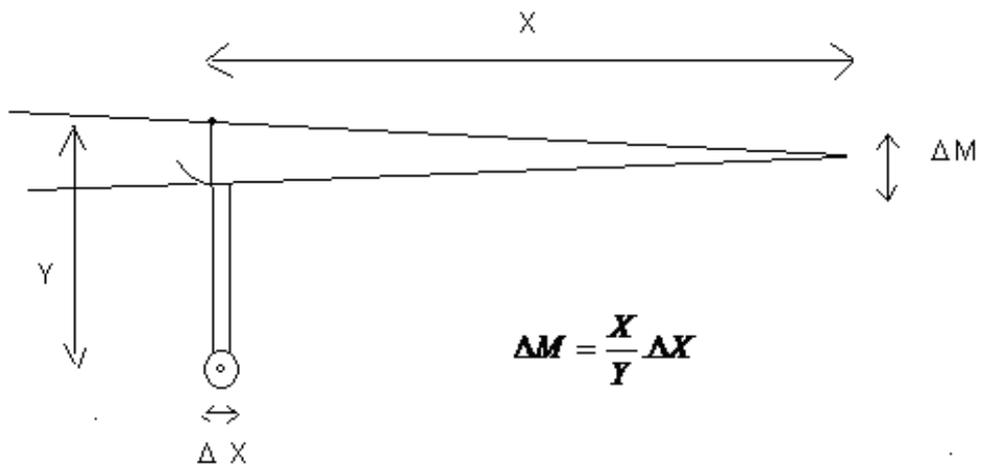
Notons que sur les F3K, les stab pendulaires utilisent parfois un support et une commande assez peu aérodynamiques (voir photo). Dans ce cas le bilan de traînée de ces appendices (présents en pendant tout le vol et notamment au lancé alors que le dérapage est important) est à mon avis très supérieur au faible gain apporté par le stab pendulaire (qui n'existe que pendant les seules spirales serrées). **Au final pour un F3K, le choix stab à volet/stab pendulaire me paraît loin d'être déterminant. Par contre la bonne intégration aérodynamique du support de stab et de la commande de profondeur avec le reste du planeur me paraît être un point important à ne pas négliger.**

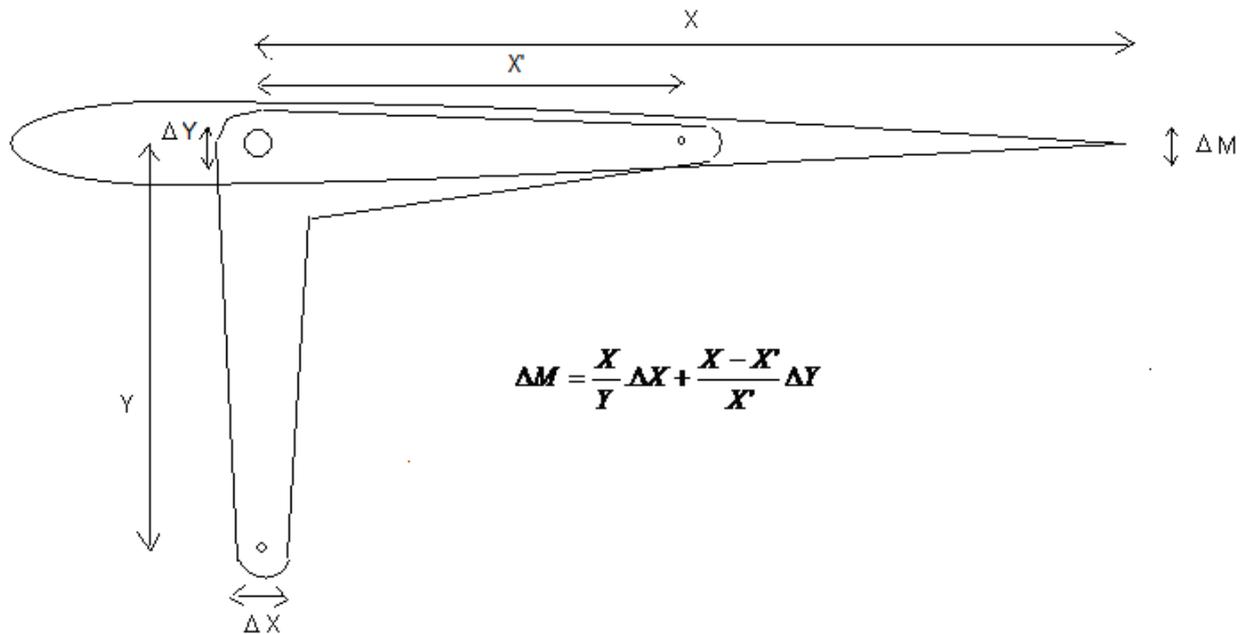


Stab pendulaire / Stab à volet : précision des commandes

Le stab à volet est souvent considéré comme plus précis qu'un stab pendulaire. Cette réputation est-elle justifiée ?

Il est vrai que par rapport au stab à volet, l'axe de rotation du stab pendulaire introduit a priori un jeu supplémentaire. Les schémas ci-dessous montrent l'influence des différents jeux sur le débattement final.





Dans tous les cas l'influence du jeu ΔX (servo + tige de commande) peut être réduite en allongeant le bras de levier Y . Mais ceci est en général beaucoup plus facile à réaliser sur un stab pendulaire que sur un volet de profondeur. Si bien qu'au final, si le jeu sur l'axe est faible, il est relativement aisé d'obtenir avec un stab pendulaire une précision équivalente ou meilleure qu'avec un stab à volet. Par contre les débattements servos étant plus importants, le servo de profondeur devra être plus rapide pour un résultat équivalent.

La surface mobile d'un stab pendulaire est beaucoup plus grande que celle d'un volet de profondeur. En conséquence beaucoup de pilotes pensent qu'un servo puissant est absolument indispensable pour mouvoir cette grande surface. En réalité si le profil de stab est symétrique et si l'axe de rotation est placé au voisinage des 25% de la corde aérodynamique, le couple demandé au servo est très faible (l'effort demandé au servo peut alors théoriquement être plus faible que pour un volet de profondeur!). Par contre le servo doit être solide car l'inertie du stab est beaucoup plus grande que celle d'un volet et les contraintes lors des chocs à l'atterrissage sont bien plus importantes : pignons métal ou carbonite conseillés...

Stab pendulaire : position de l'axe

Jusqu'à maintenant lorsqu'on me demandait où placer l'axe de rotation d'un stab pendulaire, je répondais systématiquement : juste en avant du foyer aérodynamique du stab, soit vers 22% à 23% de la corde aérodynamique moyenne.

Il y a 2 justifications à cette position :

- la portance du stab s'appliquant au foyer du stab, le couple demandé au servo sera pratiquement nul en positionnant l'axe juste au niveau du foyer, c'est-à-dire à 25% de la CAM.
- pour éviter un phénomène d'instabilité autoentretenu autour de $Cz.stab=0$, l'axe de rotation doit être placé en avant du foyer (le jeu fait basculer le stab qui de vient déporteur, le planeur remonte alors légèrement, son Cz augmente et son stab devient alors porteur, ce qui fait basculer le stab dans

l'autre sens qui devient encore plus porteur, ce qui fait piquer le planeur et diminuer le Cz, le stab devient alors déporteur, etc....)

A l'occasion de cet article, je me dis aujourd'hui que positionner l'axe en avant du foyer n'est pas forcément indispensable. En effet la position en avant du foyer se justifie pour éviter que le jeu au niveau de la clé secondaire ne génère le phénomène autoentretenu d'instabilité décrit ci-dessus. Or il y a rarement du jeu au niveau de cette clé secondaire (ou du moins celui-ci est facile à éviter). Par contre le risque de jeu est bien plus grand sur l'axe principal qui doit permettre une rotation sans trop de frottement. Le jeu sur cet axe engendre bien sûr une imprécision sur la commande (voir schéma ci-dessus) mais, contrairement au jeu sur l'axe secondaire, il ne peut pas provoquer de phénomène autoentretenu. En conclusion, s'il n'y a aucun jeu sur la clé arrière, la position de l'axe légèrement en avant du foyer ou légèrement en arrière ne changera pas grand-chose. On évitera simplement de positionner l'axe exactement au foyer pour qu'il y ait (le plus souvent possible) un léger couple sur le servo pour mettre le jeu en buté.

Un point particulier concerne les planeurs F3K avec commande profondeur par fil et ressort. Compte tenu de la vitesse de lancé, la force aérodynamique appliquée au stab peut être importante. Celle-ci est en principe déportuse (mais elle dépend surtout de la position des volets). Dans ces conditions pour que le fil de commande reste tendu, l'axe de rotation du stab doit être placé en arrière du foyer.

Conclusions :

D'un point de vue purement théorique, la traînée d'un stab pendulaire est toujours inférieure à celle d'un stab à volet. Mais cette différence de traînée n'est vraiment significative que pour les virages serrés et plus généralement lors d'évolutions sous facteur de charge. Ceci est particulièrement vrai dans les cas suivants :

- lorsque le Cz.stab peut être important: absence de volets, centrage neutre, profil aile relativement épais, domaine de vol typé voltige, ...
- et/ ou lorsque le braquage profondeur ΔV_{longi} doit être important (faible charge alaire, long bras de levier)

Ainsi le choix d'un stab pendulaire s'avère tout à fait adapté à un planeur de voltige VTPR de style breton (donc sans volets). Ce type de planeur rassemble en effet tous les critères cités ci-dessus! D'une manière générale, l'absence de volet et l'utilisation d'un centrage neutre sont les 2 principaux critères qui doivent orienter vers le choix d'un stab pendulaire.

Inversement en cas de vols plutôt paisibles, d'utilisation des volets, de profils minces, et/ou de centrage avant, la différence entre les 2 types de stab est faible, voire totalement négligeable. C'est notamment le cas pour les planeurs F3K ou F3J, ainsi que pour les planeurs de vol à voile munis de volets (centrage préférentiellement avant, charge alaire plutôt élevée, bras de levier relativement court). Dans ce cas le choix sera beaucoup plus une affaire de goût que de performance pure. Et quelle que soit la solution adoptée on n'oubliera pas que l'on a toujours intérêt à avoir la meilleure intégration aérodynamique possible de la commande de profondeur et de la jonction stab/fuselage/dérive....

En complément voici un lien vers une excellente étude de Matthieu Scherrer sur des mesures de Cz de stab en soufflerie. Ces résultats illustrent parfaitement les calculs présentés dans l'article sur le Cz de stab et le volume de stab optimal

http://www.google.fr/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fscherrer.pagesperso-orange.fr%2Fmatthieu%2Faero%2Fpapers%2FPortance_empennage_soufflerie.ppt&rct=j&q=matthieu%20scherrer%20empennage&ei=Fx6JTcL1Oo2WhQe1ls2kDg&usg=AFQjCNHpZuAH-nJusyUyNbvs3UmIgcVXpQ&cad=rja