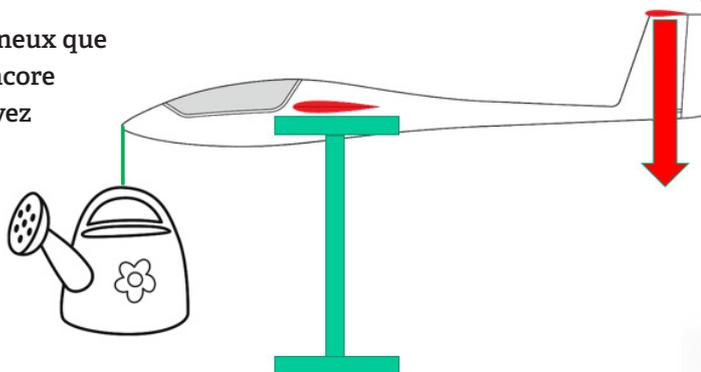


Les calages, des mythes à la réalité

Voici un sujet au moins aussi épineux que celui du centrage, et en réalité encore plus complexe. Pourtant, vous avez certainement déjà entendu ou lu qu'il suffit de caler le stab à 0° et l'aile entre +1 et +2° (par rapport à quoi ?) pour que ça vole à tous les coups. Jusqu'au moment où, exactement comme



pour le centrage au tiers, ça ne fonctionne pas ! Je vous propose de suivre la même démarche que dans l'article sur le centrage, en détricotant tout d'abord les lieux communs et autres croyances, puis en bâtissant une construction logique qui permet d'appréhender les rouages, pour enfin terminer par quelques calculs simplifiés assortis d'exemples pratiques.

Introduisons cet article par ce qui semble le plus évident à tous, la relation entre centrage et calages. Tout le monde le sait bien, si on ajoute du poids à l'avant d'un avion, le stab doit fournir un effort déporteur (vers le bas) pour le compenser, donc être réglé « cabreur », ce qui donne in fine un vol « queue basse ». Ce principe est d'ailleurs rappelé par certains articles dits techniques dans les revues spécialisées. Pour l'illustrer, on peut y voir par exemple un planeur posé sur des tréteaux, un arrosoir (rempli d'eau ?) accroché au nez et le vulgarisateur appuyant fermement sur le stab vers le bas pour compenser le poids de l'arrosoir. La

démonstration semble aussi magistrale qu'imparable... et pourtant... elle est en réalité totalement erronée !

Nous allons essayer de démystifier tout cela. Vous le verrez ci-après, démontrer l'inverse (c.a.d. que le vol queue basse n'a rien à voir avec le centrage) n'est pas beaucoup plus compliqué, à condition toutefois d'observer les choses sans a priori puis de faire preuve d'un minimum de raisonnement et de bon sens pour bien poser le problème puis assembler les conclusions dans le bon ordre. Paradoxalement, comme pour le centrage, c'est pourtant le lieu commun qui a les faveurs de nos terrains, malgré les évidences qui montrent l'inverse.

Quelques définitions essentielles

Avant toute chose, rappelons que, sans définition, aucun raisonnement n'est possible.

Donc, qu'est-ce que cette fameuse « allure de la queue » (ou du fuselage, c'est idem) ? C'est l'angle formé entre l'axe moyen du fuselage de l'avion (dont la partie la plus visible en vol est la poutre de queue) et l'horizontale, que voit un observateur depuis le sol.

Cet angle ne doit pas être confondu avec :

- l'incidence d'une voilure ou du fuselage, c'est à dire l'angle entre l'axe du profil (corde) ou du fuselage et la trajectoire.
- le calage aile / fuselage, c'est

à dire l'angle de construction entre la corde d'emplanture de l'aile et l'axe du fuselage.

Autre définition importante : le CG est le centre de gravité de l'avion, c'est-à-dire l'endroit où se résument ses masses. C'est aussi, et cela est fondamental, le centre instantané de rotation de l'avion en vol : contrairement à l'intuition commune, l'avion ne pivote pas autour des ailes, mais du CG. Ce ne semble pas très intuitif, mais c'est une réalité physique. Vous en doutez ? Regardez une vidéo d'un parapente réalisant une boucle, c'est l'aile qui tourne autour du pilote et non l'inverse, le CG de l'ensemble voile + pilote se situant environ au niveau de la tête de ce dernier. Ex. : <https://youtu.be/P9cozWkLZ6c?t=43>

Extrait de : <http://rcaerolab.eklablog.com/memento-meca-du-vol-p1326152>

Angles longitudinaux

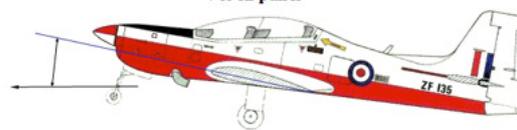
Ne pas confondre :

- **Allure (assiette)** = angle entre l'axe du fuselage et l'horizontale (sol).
- **Pente** = angle entre la direction de vol et l'horizontale.
- Angles directement perçus par le pilote au sol (via l'allure).
- **Incidence** = angle entre la corde (de l'aile, etc.) et la direction de vol.
- Angle difficile à visualiser par le pilote au sol.
- Ni l'allure ni la pente ni l'incidence ne sont des constantes, ces angles évoluent en permanence, suivant la phase de vol.
- L'incidence évolue dans les limites [de décrochage] supportées par le profil

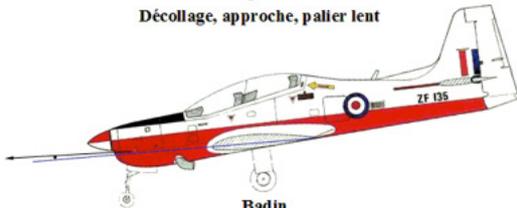
← direction de vol
— corde aile



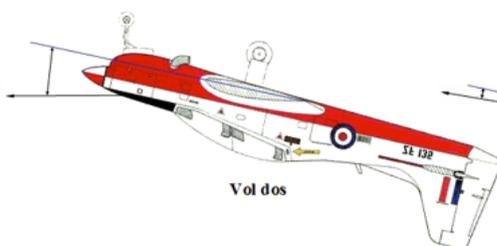
Vol en palier



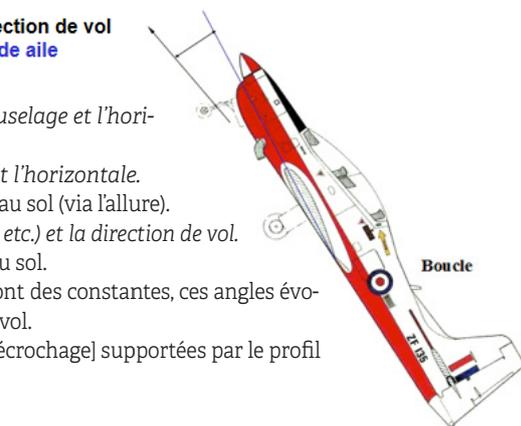
Décollage, approche, palier lent



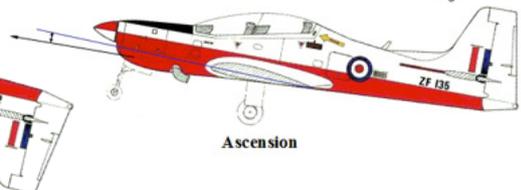
Badin



Vol dos



Boucle



Ascension

Observations et considérations pratiques

Prenez par exemple ce Baron photographié dans son élément à diverses allures, au cours d'un seul et même vol, sans changer ni le centrage ni les calages.



Approche rapide, allure queue haute



Passage rapide, allure queue légèrement haute



Passage « normal », allure queue horizontale



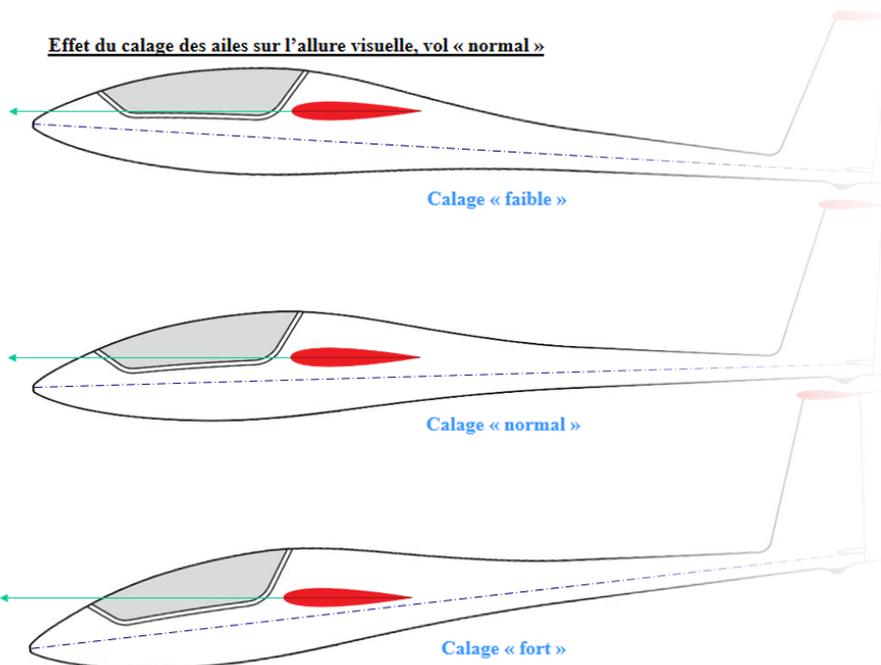
Passage très lent, allure queue très basse

de construction entre les ailes et le fuselage (précisément : avec son axe moyen, comme représenté sur ce croquis de planeur). Mettons par exemple que, pour une phase de vol donnée, l'aile soit à 0° d'incidence (classique pour un profil plan-convexe, comme le ClarkY, à une vitesse de vol « normale »). Si on cale l'aile à 0 par rapport au fuselage, alors dans cette même phase de vol le fuselage sera parfaitement horizontal. Si on met +5° de calage entre l'aile et le fuselage, alors l'allure du fuselage sera « queue haute » (de 5°), et si on met -5°, elle sera queue basse (de 5°).

Effet du calage des ailes sur l'allure visuelle

Cet angle matérialisant l'allure visuelle peut être modulé grâce au calage

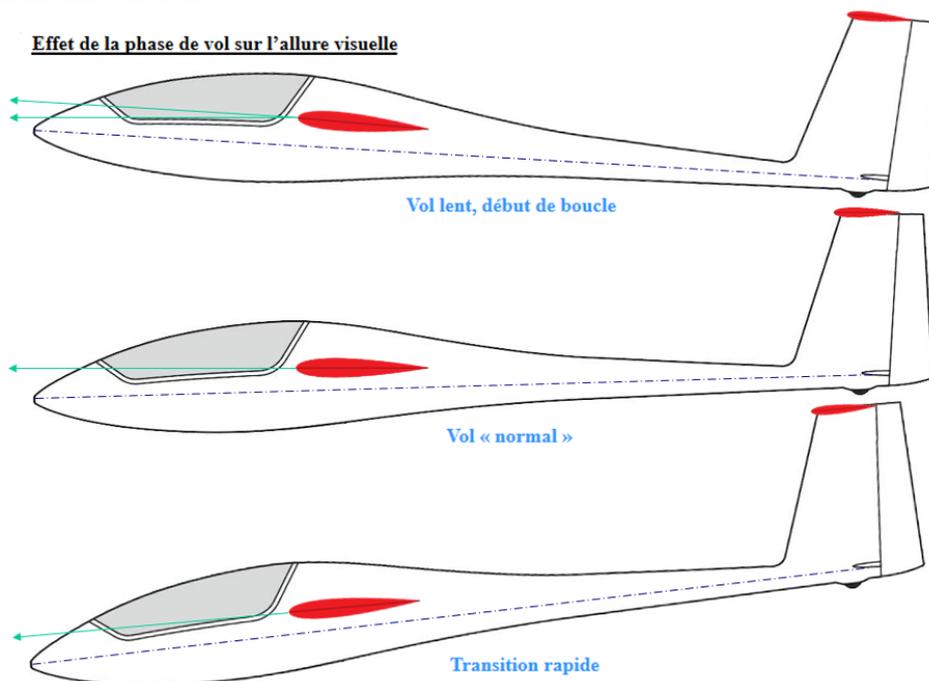
Effet du calage des ailes sur l'allure visuelle, vol « normal »



Effet de la phase de vol sur l'allure visuelle

La conclusion de ces photos en vol coule de source : c'est la phase de vol qui détermine en premier lieu l'allure de la queue. Plus l'avion vole lentement et plus il faut d'incidence à l'aile pour fournir la portance (rappelez-vous : la portance est proportionnelle à l'incidence et au carré de la vitesse). Comme l'aile est liée au fuselage, l'angle formé entre la queue et l'horizon (qui est celui que l'observateur au sol perçoit et classe comme queue basse, haute, etc.) n'est, de fait, pas du tout le même suivant la phase de vol.

Effet de la phase de vol sur l'allure visuelle

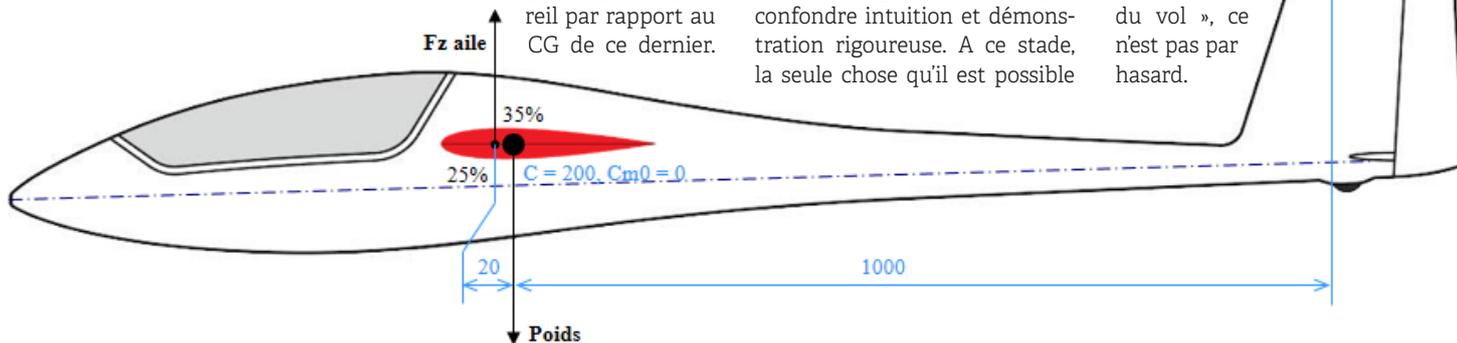


Hormis les considérations purement esthétiques, ces différentes allures de fuselage ont une conséquence directe sur sa traînée. En effet, plus le fuselage est incliné par rapport à la trajectoire, et plus il va traîner. Cela n'a pas vraiment d'importance pour la majorité des avions, mais il en va tout autrement en compétition planeur par exemple car cette traînée de fuselage peut sensiblement dégrader la finesse et le taux de chute. On a donc tout intérêt à soigner le calage ailes / fuselage, de manière à aligner le fuselage au mieux dans la trajectoire, et cela pour la phase de vol la plus représentative du domaine de vol. Pour les autres phases, le fuselage traînera fatalement plus.

Effet direct du centrage

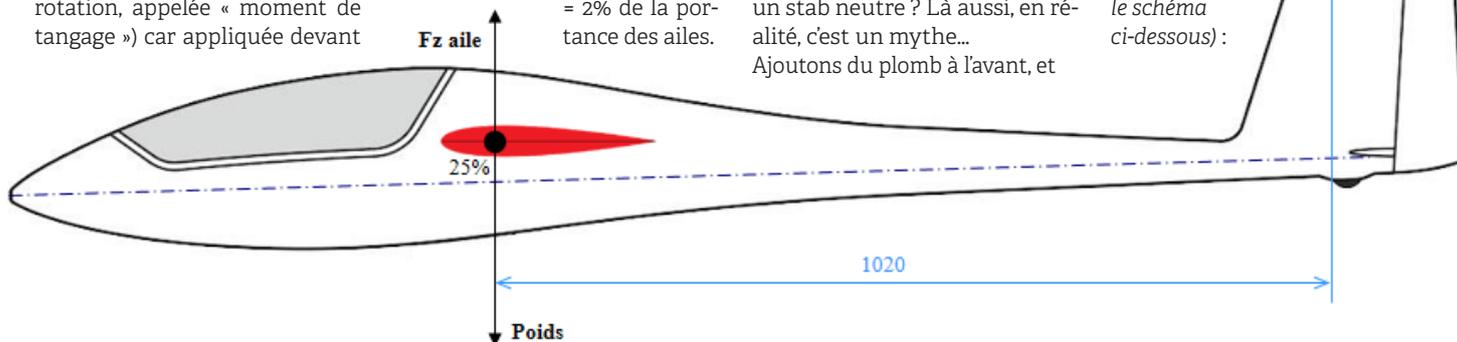
Et le centrage dans tout cela ? Là aussi, prenons les choses méthodiquement, et revenons à ce qu'il se passe si on pose sur des tréteaux, toujours par les ailes, un canard ou un tandem (Pou du Ciel) : avant même qu'on accroche notre fameux arrosoir, le premier tombe sur le nez et le second sur la queue. Prenons aussi un appareil à forte flèche, comme le Choucas de Robert Bardou, et on pourra reproduire ces deux cas de figures opposés, suivant qu'on pose les ailes côté emplanture ou côté saumon.

Le point commun entre tous ces exemples est la position de l'appui sur lequel on pose l'appareil par rapport au CG de ce dernier.



Par rapport au CG, qui est en l'air le centre de rotation de l'avion, on constate que la portance des ailes (résumé à leur foyer, situé à 25% de la corde moyenne) donne une tendance à cabrer (force de rotation, appelée « moment de tangage ») car appliquée devant

le CG. Le stabilisateur doit donc fournir une portance pour annuler ce moment, d'une valeur proportionnelle (du ratio des bras de levier) à celle des ailes. Soit ici $20/1000 = 2\%$ de la portance des ailes.



La conséquence directe de cette avancée de CG est le changement des bras de levier entre les foyers des voilures et le CG. Le bras de levier de l'aile est devenu nul, tandis que celui du stab est plus grand. En conséquence, la portance du stab nécessaire à assurer l'équilibre en tangage est maintenant nulle. Contrairement à l'intuition

commune, avancer le centrage n'a pas rendu le stab déporteur (sous-entendu, le stab d'un avion bien conçu et réglé serait censé être neutre), il l'a rendu moins porteur... la différence est subtile, mais de taille. Au passage, nous pouvons aussi déduire que, dans le cas présent, avancer le CG a augmenté l'efficacité du stab grâce à son bras

Si on veut avoir une situation de départ correcte, il faut poser l'appareil exactement à l'aplomb du CG. Or, ce dernier ne se situe pas forcément sur les ailes ! Je vous invite à cet effet à relire la synthèse publiée dans ces colonnes sur le centrage.

Ceci étant dit, que se passe-t-il maintenant si l'on fait les choses correctement, c'est-à-dire si on pose en équilibre l'avion en son CG sur un support articulé ou ponctuel qui ne contrarie pas la rotation de l'avion (ce qui est précisément ce que l'on fait pour vérifier la position du CG). Effectivement, si on ajoute du poids dans le nez, le nez bascule en avant, et inversement. De là à conclure qu'il faut une déportance au stab pour compenser ce poids à l'avant, c'est aller trop vite en besogne : il ne faut pas confondre intuition et démonstration rigoureuse. A ce stade, la seule chose qu'il est possible

d'affirmer avec certitude c'est qu'en mettant du poids à l'avant, nous avons juste avancé le CG... mais le travail du stab en est-il pour autant modifié ? Et bien, disons-le clairement, la réponse est loin d'être aussi évidente que notre expert nous l'a vendue...

Afin de commencer à appréhender l'essentiel du mécanisme, prenons un exemple concret le plus simple possible (ailes et stab rectangulaires, profils symétriques, calage ailes à 0 par rapport à l'axe du fuselage, centrage à 35% de la corde...). Pour l'instant, l'incidence de l'aile n'est pas représentée, nous en parlerons plus loin, ce qui importe à ce stade sont les forces et les bras de levier. On parle de « mécanique du vol », ce n'est pas par hasard.

L'avion est alors « équilibré » en tangage, c'est-à-dire que la somme des moments de tangage est nulle. Sans cela, l'avion ne volerait pas droit. Qui a dit qu'un avion ne vole bien qu'avec un stab neutre ? Là aussi, en réalité, c'est un mythe... Ajoutons du plomb à l'avant, et

reposons l'avion sur le nouveau CG qui tombe maintenant au quart de la corde (voir le schéma ci-dessous) :

de levier plus grand (c'est l'inverse sur un canard). Concrètement, pour fournir un moment en tangage donné, le stab a alors besoin de fournir moins d'effort. En plus du changement de bras de levier de la portance de l'aile, cela contribue aussi à rendre plus stable l'avion centré plus avant, ce qui est le but du réglage du centrage.

Mais, attention : ce n'est pas pour autant qu'il faut moins de débattement à la profondeur si on avance le centrage. En effet, la manœuvrabilité en tangage est minorée par l'augmentation du bras de levier (on parle d'amortissement plus grand). De plus, avancer le centrage augmente la stabilité du modèle, donc le besoin en débatte-

ment du stab pour piloter une rotation en tangage donnée. Au final, tous ces effets étant combinés, il faut plus d'autant plus de débattement à la profondeur que l'on avance le centrage pour conserver la même vivacité sur cet axe.

Influence du centrage sur les calages d'ailes et de stab

On avance (pas juste le centrage !), mais on ne répond toujours pas, même si on s'en approche grandement, à la question initiale : quel est l'effet du centrage sur le trim de profondeur et sur l'allure de vol ? Pour cela, il faut revenir à la relation fondamentale entre portance et incidence, qui s'exprime sous la forme :

$$Rz = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot Cz$$

Avec :

- **Rz** la portance de la voilure
- **ρ (rho)** la masse volumique de l'air, environ 1.2 kg/m³
- **V** la vitesse de vol, en m/s
- **S** la surface des ailes, en m²
- **Cz** le coefficient de portance de la voilure :
Cz = 0,11.A.($\alpha - \alpha_0$)
- **α (alpha)** l'incidence de la corde du profil
- **α_0** l'incidence de portance nulle du profil
- **A** l'efficacité de portance de la voilure (cf. article sur le centrage)

Au-delà de l'équation, retenons juste que la portance est proportionnelle à l'incidence, d'un ratio identique à tous les profils. Dans le cas que nous venons d'étudier, le stab a vu sa portance passer d'une valeur positive à zéro. Pour obtenir ce résultat, il a donc fallu diminuer son incidence, soit en le recalant soit en le trimmant, donc in fine dans le sens à cabrer pour l'avion. Dans le cas d'un canard, c'est l'inverse, avancer le centrage nécessite d'augmenter la portance, donc l'incidence, du stab.

Ouf, l'honneur est (presque) sauf, c'est bien la conclusion attendue, avancer le centrage nécessite donc

bien de recaler / trimmer à cabrer. Pour autant, avons-nous juste enfoncé une porte ouverte par rapport à l'illustration de l'arrosoir pendu au bout de sa ficelle ? Clairement, non, car il y a la subtile différence abordée ci-avant : le lieu commun veut qu'un centrage « avant » donne un stab « cabreur », alors qu'en réalité il s'agit d'un recalage à cabrer par rapport au calage initial, qui n'est pas forcément nul. Le résultat n'est donc pas forcément cabreur, comme dans l'exemple précédent.

De plus, trouver un résultat presque juste par un raisonnement totalement faux n'est certainement pas la bonne approche, sachant que la conclusion finale (voir ci-après) est quant à elle fautive. Ici, en suivant pas à pas un cheminement logique, nous avons abordé des notions et une vision d'ensemble qui vont nous permettre d'aller plus loin. En particulier, grâce à quelques calculs simples, il est possible d'avoir une bonne approximation des calages à utiliser pour un vol correct, soit pour vérifier un appareil existant, soit pour faire les bons choix lors d'une construction. Finissons cette partie par l'allure de vol. Dans l'exemple qui précède, en vol équilibré, nous avons le bilan des forces suivant :

- Situation initiale : la portance des ailes est égale à 98% du poids tandis que les 2% restant sont fournis par le stab.
- Centrage avancé : la portance des ailes est égale à 100% du poids.

Nous pouvons donc conclure qu'avancer le centrage impose ici à l'aile de fournir 2% de portance en plus. Si nous avons par exemple une efficacité de portance de l'aile de A = 0,5, et que le vol se fait à Cz = 0,6, soit une incidence de 10,9° pour un profil symétrique, on trouve - en utilisant la relation entre Cz et incidence - une augmentation d'incidence de

$0,6 \cdot 0,02 / (0,11 \cdot 0,5) = 0,22^\circ$, soit +0,17% (!) par rapport à l'incidence initiale. Le fuselage étant lié à l'aile, l'allure visuelle de ce dernier a donc augmenté du même angle. Alors oui, en théorie, notre planeur centré plus avant vole maintenant un peu plus queue basse, mais dans une proportion tellement faible qu'elle en est parfaitement indétectable, malgré l'avancée de centrage de 10%, ce qui est déjà particulièrement significatif. Et cela reste vrai avec des centrages encore plus avancés. L'assertion qui voudrait qu'un centrage trop avant fait voler queue basse, déduite d'un raisonnement erroné sur l'influence du centrage sur le calage / trim du stab, est donc tout simplement fautive... ce que l'on constate aussi en pratique. Faites l'exercice sur votre trainer favori, sans a priori et méthodiquement (n'oubliez pas de corriger le débattement et le trim profondeur à chaque changement de centrage), et vous verrez. Mais attention, le plus dur ne sera pas de vérifier l'allure du fuselage, mais surtout de reproduire à chaque vol strictement la même condition de vol. Ce qui nous fait revenir aux photos de cet article, et de la conclusion qui en découle.

A noter aussi que :

- chaque réglage a sa fonction : le centrage pour la stabilité, le calage des ailes pour l'allure du fuselage, le calage du stab pour équilibrer les moments en tangage et donc voler droit.
- les influences entre les réglages ne sont pas réversibles : le centrage influe par effet induit sur le calage de stab, mais pas l'inverse.

On ne règle donc pas un problème de stabilité en touchant aux calages, ni un problème de calage(s) en touchant au centrage, ni un problème d'allure de fuselage en touchant au calage du stab ou au centrage.

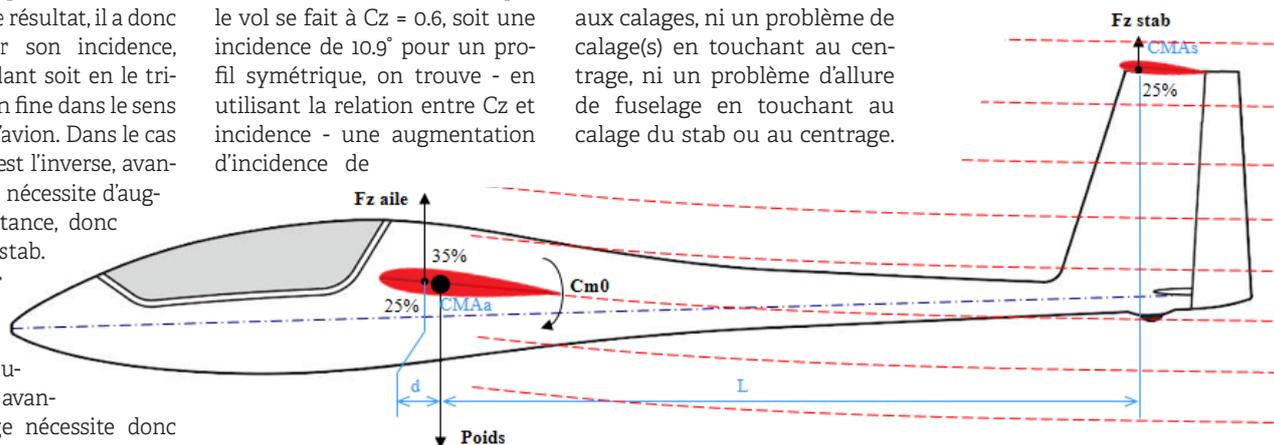
C'est tellement évident une fois dit, et pourtant on voit et entend cela tous les WE...

Quelques calculs de base

Par rapport à notre exemple simplifié, les choses peuvent être un poil plus complexes :

- le stab travaille dans une couche d'air défléchi par la portance des ailes (*traits en pointillés rouge sur le croquis qui suit*), c'est la déflexion de sillage. Contrairement à l'intuition commune, cette déflexion s'étend largement autour de l'aile et concerne aussi un stab en Té. Mettons que, dans une phase de vol donnée, elle soit de 1° vers le bas, et qu'il faille que le stab fonctionne à +1° d'incidence pour assurer l'équilibre longitudinal. Concrètement, il faudra donc caler le stab à +2°. Nous sommes loin du calage à zéro revendiqué par défaut comme valeur universelle.
- le Cmo du profil d'aile, qui représente son moment propre (typiquement, plus un profil est creux et plus il a une tendance marquée à piquer, et inversement pour un profil dit « auto-stable ») n'est pas forcément nul.
- les voilures peuvent être d'une forme plus complexe qu'un simple rectangle, dans ce cas on travaille sur la corde moyenne, avec toujours le foyer de l'aile à 25% de cette dernière.

Nous obtenons le schéma suivant, qui va nous permettre de calculer de manière simplifiée (mais représentative, ce n'est pas du bricolage...) les calages à utiliser :



Pour distinguer les ailes du stab, nous noterons « a » ce qui est relatif aux premières et « s » pour le second.

Avant tout calcul, il faut d'abord sélectionner le Cz de l'aile, appelé aussi Cz de réglage, pour lequel la machine sera équilibrée. Par défaut, 0.3 est une valeur passe-partout qui convient bien à la majorité des usages. Commençons par le calage des ailes, en trouvant l'incidence correspond au Cz de réglage. Incidence que l'on utilisera pour caler les ailes par rapport au fuselage, de manière à aligner parfaitement ce dernier à la trajectoire au Cz de réglage. Nous avons la relation suivante entre le Cz et l'incidence des ailes :

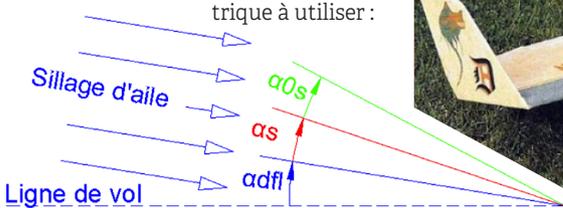
$$\alpha_a = 9,1 \frac{Cz_a}{A_a} + \alpha 0_a$$

L'efficacité de portance A est calculée suivant la formule simplifiée déjà abordée pour le centrage, qui fait intervenir l'allongement :

$$\text{Pour l'aile : } A_a = \frac{\lambda_a}{2 + \lambda}$$

$$\text{et pour le stab : } A_s = \frac{\lambda_s}{2 + \lambda_s}$$

Le calcul du calage de stab est sensiblement plus complexe car il fait intervenir la portance de stab à fournir pour équilibrer les moments de l'aile (moment de portance + moment de profil) autour du centre de gravité. On en déduit l'incidence aérodynamique correspondante (α_s), que l'on corrige avec l'incidence de portance nulle du profil de stab ($\alpha 0_s$) et l'angle de déflexion de sillage imposé par l'aile (αdlf) pour enfin obtenir le calage géométrique à utiliser :



Calage géométrique de stab :

$$\alpha \kappa_s = \alpha_{dfl} + \alpha_s + \alpha 0_s$$

Soit, en développant la formule :

$$\alpha \kappa_s = 9,1 \cdot (\varepsilon' \cdot \frac{Cz_a}{A_a} + \frac{Cz_s}{A_s}) + \alpha 0_s$$

Avec :

Angle de déflexion de sillage local :

$$\alpha_{dfl} = 9,1 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{Cz_a}{A_a}$$

Incidence du stab dans le flux d'air local :

$$\alpha_s = 9,1 \cdot \frac{Cz_s}{A_s}$$

Cz de stab (formule simplifiée) :

$$Cz_s \approx \frac{Cz_a \cdot (CG\% - 25\%) + Cm 0_a}{V_{stab}}$$

Coefficient de déflexion (simplifié) :

$$\varepsilon' = \frac{4}{2 + \lambda_a}$$

À noter que les angles d'incidence et de calage sont positifs quand le bord d'attaque est plus haut que le bord de fuite (portance +), et négatif dans le sens inverse (portance -).

Reste à connaître l'incidence et le moment à portance nulle ($\alpha 0_a$ et $Cm 0$) du profil d'aile, ainsi que le $\alpha 0_a$ du profil de stab (on néglige son $Cm 0$), que l'on peut facilement trouver sur internet pour une majorité des profils, calculer suivant la recette de cuisine proposée dans « RC Aero Design » (voir l'espace « boutique » sur le site FFAM), ou bien avec une soufflerie numérique comme xFoil. Pour aller plus loin, je vous invite à utiliser le logiciel gratuit PredimRC, qui assure sans efforts tous ces calculs avec des formulations bien plus complètes, en prenant en compte par exemple l'effet du fuselage, et en intégrant xFoil.

Quelques applications numériques

Prenons tout d'abord un petit avion traîner tout ce qu'il y a de classique :

- des ailes de surface 12 dm², allongement 6, corde moyenne 200 mm, profil ClarkY avec $\alpha 0_a -3.6^\circ$ et $Cm 0 -0.085$
- un stab de 5 dm², allongement 4, $V_{stab} 0.5$, profil planche avec $\alpha 0_a$ nul
- un centrage à 35% de la corde moyenne de l'aile

Nous trouvons les résultats intermédiaires :

- Efficacité de portance ailes : $Aa = 6 / (6 + 2) = 0.75$
- Efficacité de portance stab : $As = 4 / (4 + 2) = 0.67$
- Coefficient de déflexion : $\varepsilon' = 4 / (2 + 6) = 0.5$
- Angle de déflexion : $\alpha dfl = 9.1 * 0.5 * 0.3 / 0.75 = +1.8^\circ$
- Cz stab : $Czs = (0.3 * (0.35 - 0.25) - 0.085) / 0.5 = -0.11$
- Incidence de stab : $\alpha s = 9.1 * (-0.11) / 0.67 = -1.5^\circ$

Soit les résultats finaux :

- Calage d'ailes = $9.1 * 0.3 / 0.75 - 3.6 = 0^\circ$
- Calage de stab = $1.8 - 1.5 = +0.3^\circ$

Maintenant, un planeur type F3B :

- ailes de surface 49 dm², allongement 18, corde moyenne 175mm, profil avec $\alpha 0_a -1.7^\circ$ et $Cm 0 -0.04$
- stab de 6.5 dm², allongement 7, $V_{stab} 0.4$, profil symétrique avec $\alpha 0_a$ nul
- centrage à 40% de la corde moyenne de l'aile

Nous trouvons les résultats intermédiaires :

- Efficacité de portance ailes : $Aa = 18 / (18 + 2) = 0.9$
- Efficacité de portance stab : $As = 7 / (7 + 2) = 0.78$
- Coefficient de déflexion : $\varepsilon' = 4 / (2 + 18) = 0.2$
- Angle de déflexion : $\alpha dfl = 9.1 * 0.2 * 0.3 / 0.9 = +0.6^\circ$
- Cz stab : $Czs = (0.3 * (0.4 - 0.25) - 0.04) / 0.4 = +0.013$
- Incidence de stab : $\alpha s = 9.1 * 0.013 / 0.78 = +0.15^\circ$

Soit les résultats finaux :

- Calage d'ailes = $9.1 * 0.3 / 0.9 - 1.7 = +1.3^\circ$
- Calage de stab = $0.6 + 0.15 = +0.75^\circ$

L'exercice peut être conduit de la même manière avec un canard (attention, le volume de stab est négatif), mais en prenant un coefficient de déflexion nul puisque le stab travaille devant l'aile et ne subit donc pas le sillage de cette dernière. Idéalement, il faudrait appliquer une correction de l'incidence de l'aile qui travaille derrière le stab, mais on peut la négliger au premier ordre car le stab est généralement d'une envergure sensiblement plus petite que celle de l'aile.

Nous avons, pour l'exemple :

- des ailes de surface 12 dm², allongement 6, corde moyenne 200 mm, profil NACA 2408 avec $\alpha 0_a -2.1^\circ$ et $Cm 0 -0.05$
- un stab de 4 dm², allongement 4, $V_{stab} -0.25$, profil ClarkY avec $\alpha 0_a -3.6^\circ$
- un centrage à -5% de la corde moyenne de l'aile



Nous trouvons les résultats intermédiaires :

Efficacité de portance ailes :

$$Aa = 6 / (6 + 2) = 0.75$$

Efficacité de portance stab :

$$As = 4 / (4 + 2) = 0.67$$

Coefficient de déflexion : $e' = 0$

Angle de déflexion : $adfl = 0$

Cz stab :

$$Czs = (0.3 * (-0.05 - 0.25) - 0.05) / (-0.25) = +0.56$$

Incidence de stab :

$$as = 9.1 * 0.56 / 0.67 - 3.6 = +4.0^\circ$$

Soit les résultats finaux :

Calage d'ailes =

$$9.1 * 0.3 / 0.75 - 2.1 = +1.5^\circ$$

Calage de stab =

$$4.0 + 0 = +4.0^\circ$$

Finalement, rien de bien compliqué, il suffit d'une calculatrice basique pour réaliser tous ces calculs plutôt élémentaires. En revanche, comme nous venons de le voir, il n'y a pas de résultat générique et universel. Beaucoup de facteurs interviennent dans la détermination des calages, tous pouvant être très différents d'un appareil à l'autre (les allongements, le volume de stab ainsi que les Alpha0 et Cmo profil). Exactement comme pour le centrage, la méthode et les calculs associés ont bien plus d'importance que le résultat final, qui n'est pas forcément transposable d'un appareil à l'autre.

A noter que, dans le cas d'ailes mal calées par rapport au fuselage, ou volontairement décalées pour obtenir par exemple une allure de vol « queue haute » pour l'esthétique, il faudra corriger le calage du stab du même écart que celui des ailes.

Dépendance du trim de profondeur à la vitesse

Pour achever ce tour d'horizon, nous allons aborder un dernier point que connaissent bien les compétiteurs planeurs : ils règlent généralement leurs machines avec des trims de phases, qui consistent à un recalage du trim de profondeur en fonction de la vitesse de vol à laquelle le planeur doit évoluer, par ex. pour une phase vitesse et une phase gratte. Ce recalage est d'autant plus marqué que le centrage est avant. L'explication tient à l'effet principal du centrage, qui est la modification de la stabilité, c'est-à-dire la tendance d'autant plus marquée que le centrage est avant à revenir à l'incidence d'équilibre, et donc à la vitesse associée en planée, réglée par le trim de profondeur. En conséquence, plus la machine vole à une incidence différente de celle d'équilibre, et plus elle tendra à en sortir pour revenir à cette dernière.

Typiquement, une machine centrée très avant nécessite de pousser en permanence pour voler vite, soutenir sensiblement à cabrer pour voler lentement ou pousser fortement pour tenir le vol dos. A contrario, une machine réglée parfaitement neutre ne nécessite une action à la profondeur que pour inscrire une nouvelle trajectoire, et reste ensuite sur cette dernière une fois le manche lâché. Dans ce cas de figure, le trim de profondeur est réglé une fois pour toute et convient à toutes les phases de vol, vol dos y compris.

Cette dépendance du trim de profondeur, ou du calage de profondeur (c'est idem), au centrage et à la vitesse de vol est universelle, et vaut pour toutes les configurations : avions et

planeur classique, mais aussi ailes volantes (via le recalage des élévons), canards et tandems. Avec deux limites :

- dans le sens du recul du centrage : le trim est bien recalé à piquer, jusqu'à atteindre le centrage neutre. A ce point précis, il n'y a plus qu'un seul réglage de trim, et derrière ce point il n'y a aucun réglage qui convienne, le moindre trim à piquer ou cabrer se traduit par une divergence de trajectoire.
- dans le sens de l'avancé : plus on avance le centrage et plus le chargement du stab risque d'augmenter, que ce soit à porter ou à déporter suivant la configuration, jusqu'à atteindre, en particulier à basse vitesse, la limite décrochage. C'est un problème bien connu des canards, où le stab (de par la position du CG) est généralement plus chargé que l'aile et décroche toujours en premier. Avec ce type d'appareil, la plage de centrage utilisable est fortement réduite par cette contrainte.

Au passage, nous venons de finir de démontrer que, quelle que soit la conception et le réglage d'un modèle, la recherche de neutralité de son stab pendant tout le vol est une utopie. Cette neutralité n'existe tout simplement pas pour beaucoup de machines, et pour d'autres cela ne concerne qu'une seule incidence parmi toutes celles balayées dans le domaine de vol. Dans tous les cas, la portance d'un stab évolue en permanence tout au long du vol, en positif comme en négatif.

De plus, la neutralité du stab n'est absolument pas un levier d'amélioration des performances (je vous invite à lire cette étude : <http://rcaerolab.eklablog.com/centrage-perfos-et-resenti-p1674598>). Là aussi c'est un mythe, malheureusement largement entretenu. En réalité, un stab porteur aux faibles régimes de vol est plutôt bénéfique pour les performances, car la portance apportée par le stab dans cette phase

de vol se fait avec une moindre traînée additionnelle que si c'est l'aile qui devait la fournir (à cause de la traînée induite de l'aile, au carré de la portance). C'est d'ailleurs ainsi que sont conçus tous les planeurs de performance, du F3K au F3Q, mais aussi les racers F5D, etc.

Cela semble contre-intuitif de prime abord, mais la portance de l'aile est la même quelle que soit sa courbure (voir graphique en bas de page). En fait, c'est tout ce qu'il y a de plus logique : en plané en ligne droite, la portance est strictement égale au poids, quelle que soit la vitesse de vol. Le Cz de l'aile ne dépend donc que de la vitesse, précisément de l'inverse de sa racine carré (voir l'équation de la portance ci-avant). Par contre, comme la cambrure des ailes modifie le Cmo des ailes, le chargement du stab varie en suivant celui de l'aile modulo le réglage de la courbure.

Vous l'aurez certainement noté au passage : comme la cambrure des ailes modifie aussi sensiblement leur calage (via le déplacement du bord de fuite), l'allure visuelle du fuselage est sensiblement modifiée aussi, ainsi que sa traînée. Il en est de même pour les appareils à incidence intégrale, pour lesquels l'incidence de fuselage suit beaucoup mieux la trajectoire.

Conclusion

A l'heure d'internet, qui offre un accès gratuit à de nombreuses publications, ouvrages et logiciels qui permettent de se faire une idée sérieuse des choses, il est toujours surprenant que nombre de croyances et autres fake news aient toujours bonne presse. J'espère que ce papier vous aura permis de revisiter avec un nouvel éclairage cet aspect essentiel du vol de nos avions et planeurs, et qu'il vous aidera à mieux concevoir et régler vos appareils.

■ Franck Aguerre

<http://rcaerolab.eklablog.com/>

