

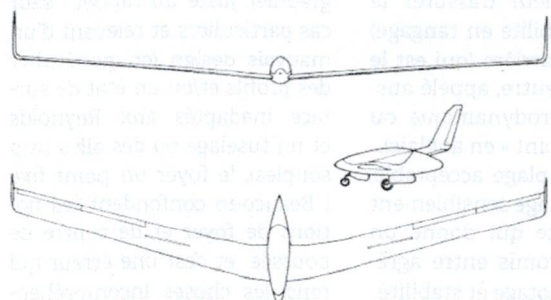
Le centrage, c'est enfin vraiment [presque] simple !

Il y a quelques temps, lors d'une énième discussion sur un forum au sujet du centrage d'un avion « classique », une phrase m'a marqué : « calculer le centrage de cet avion [au lieu d'utiliser le tiers de la corde] revient à sortir la tronçonneuse pour cueillir une fleur ». Cette petite pique n'est pas si anodine car elle soulève en filigrane deux points fondamentaux qui méritent de s'y attarder. D'une part le centrage, malgré tous les efforts de vulgarisation entrepris ces dernières années, est toujours le sujet d'une grande incompréhension chez de nombreux modélistes. D'autre part cette remarque n'a-t-elle pas une certaine pertinence ? En effet, beaucoup d'appareils « classiques » volent plutôt pas si mal centré « à la louche », alors y a-t-il un réel intérêt à investir du temps, voire se prendre la tête, à creuser plus loin ?

La réponse à cette interrogation n'est pas triviale, car la définition d'un « modèle classique » n'est déjà pas identique d'une personne à l'autre. Pour certains c'est un « traîner » type Calmato, pour d'autres un planeur de début, et pour d'autres encore c'est plutôt un voltigeur « basique », etc. Et, partant de là, à partir de quand une configuration s'éloigne-t-elle suffisamment de cette définition pour être classée comme exotique, nécessitant alors de prendre des précautions ?

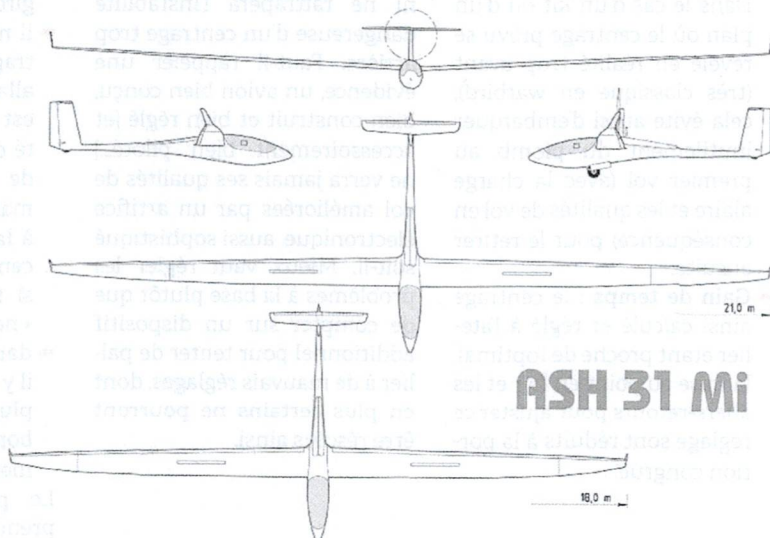
De même, le niveau d'exigence de chaque pilote n'est pas identique. Certains seront à l'aise avec à peu près n'importe quel avion réglé sommairement, ou du moins feront avec, d'autres ont besoin de réglages aux petits oignons pour en tirer le meilleur parti. Il ne faut pas non plus renier l'expérience des bons pilotes, qui permet de s'accommoder d'un centrage approximatif au premier vol pour ensuite le régler au fil de la mise au point.

Quatre appareils totalement différents, mais un seul principe de centrage !



Si on prend un peu de recul, on se rend aussi compte qu'il existe un fossé entre le principe du centrage (girouette / balance aérodynamique), déjà très mal compris par beaucoup, et sa traduction en calculs, où une bonne partie des « rescapés » finissent de perdre pied. Il est alors tentant de se raccrocher à des schémas simples et rassurants, mais pas forcément justes comme le centrage au tiers ou sur la clé, quitte à attribuer quelques déconvenues à des facteurs bien commodes (trop de vent, top radio, etc.).

Toute l'ambition de cet article réside justement à essayer d'établir le chaînon manquant entre le principe générique et sa concrétisation, pour rendre le tout moins abstrait et plus facile à assimiler. Pour cela, rien ne vaut l'exemple par l'image puis la mise en œuvre pratique avec une méthode accessible à tous.



ASH 31 Mi

Commençons donc par la base : à quoi cela sert-il ?

Dans le principe, déterminer et régler correctement à l'atelier le centrage d'un appareil présente des vertus indéniables :

➤ **Qualités de vol** : certes, le centrage est très loin d'être le seul critère qui fait qu'un appareil vole bien (la forme des ailes, la taille et la position de l'empennage, les profils, les vrillages, les calages, la charge alaire, les moments d'inerties, la rigidité structurale, etc., sont tout aussi essentiels), mais un centrage un peu trop loin de l'optimal dégrade à coup sûr les qualités de vol, même si l'appareil reste volable.

➤ **Sécurité du premier vol** : partir avec un centrage trop avant ou arrière est rarement un gage de survie du modèle, pas plus que de sérénité pour son pilote surtout quand l'enjeu est important (temps passé, argent investi, taille du modèle avec risque pour la sécurité des autres pratiquants, etc.).

➤ **Gain de masse** : connaître à l'avance le centrage correct permet d'anticiper le positionnement des éléments lourds et ainsi limiter le risque - suivant le résultat des premiers vols - d'avoir à ajouter du plomb devant ou derrière (et donc d'alourdir le modèle), voire de devoir opérer des modifications plus importantes (comme revoir l'installation radio par ex.) pour ré-agencer les masses. Dans le cas d'un kit ou d'un plan où le centrage prévu se révèle en réalité trop avant (très classique en warbird), cela évite aussi d'embarquer inutilement du plomb au premier vol (avec la charge alaire et les qualités de vol en conséquence) pour le retirer ensuite.

➤ **Gain de temps** : le centrage ainsi calculé et réglé à l'atelier étant proche de l'optimal, la mise au point en l'air et les allers-retours pour ajuster ce réglage sont réduits à la portion congrue.

Cela concerne tous les modèles : les créations perso, évidemment, mais aussi les kits du commerce et les plans (revues, internet), dont la mise au point n'a pas forcément été poussée jusqu'au bout (et parfois pas du tout...) ou dont l'auteur a, par précaution, préféré indiquer un centrage un peu plus avant que celui trouvé lors de la mise au point. Les exemples ne manquent pas.

Il y a aussi un inconvénient à cette démarche : calculer le centrage demande quelques efforts ! Et, justement, le principal objectif de cet article est de vous faire découvrir que l'effort en question est plutôt modéré, tant de compréhension que d'application, et ne nécessite pas du tout de compétences poussées en calcul ou en informatique.

Une remarque avant de passer à la suite : même si, à la lecture d'articles militant dans la presse aéromodéliste, vous êtes convaincu qu'équiper son appareil d'un système de stabilisation électronique résoudra tout besoin de mise au point, lisez quand même ce qui suit. En effet, ce type d'artifice ne servant qu'à filtrer les écarts de trajectoires non désirés, qu'ils soient causés par des défauts du modèle, des effets induits dus à des mauvais réglages ou les mouvements d'air dans lequel il évolue, aucun système ne rendra plus communiquant un planeur centré trop avant, ni ne réduira la vitesse de décrochage d'un warbird trop lourd à cause d'un plomb de centrage pas toujours justifié, ni ne rattrapera l'instabilité dangereuse d'un centrage trop arrière. Faut-il rappeler une évidence, un avion bien conçu, bien construit et bien réglé [et accessoirement bien piloté...] ne verra jamais ses qualités de vol améliorées par un artifice électronique, aussi sophistiqué soit-il. Mieux vaut régler les problèmes à la base plutôt que de compter sur un dispositif additionnel pour tenter de pallier à de mauvais réglages, dont en plus certains ne pourront être résolus ainsi.

Un rappel de quelques principes

Sans rentrer dans les détails, déjà développés dans nombre de publications et dans tous les ouvrages sérieux sur la mécanique du vol (voir la rubrique bibliographie), on retiendra les principes suivants :

➤ réaliser le centrage d'un appareil veut dire « positionner son centre de gravité à un endroit adapté au vol », cette opération se faisant en déplaçant les masses (accus, etc.) ou en ajoutant du plomb à l'avant ou à l'arrière suivant le cas de figure.

➤ le centrage détermine la stabilité de route de l'appareil, c'est-à-dire sa capacité à revenir à sa trajectoire naturelle après un ordre à la profondeur ou une perturbation d'air (exactement comme une girouette qui suit plus ou moins bien le vent suivant la position de son articulation).

➤ contrairement à un mythe très répandu, le centrage n'a quasiment aucun effet sur les performances ; ce qu'on ressent au manche est uniquement une question de comportement (manœuvrabilité et effets induits éventuels).

➤ le centrage ne dépend pas des profils des ailes ou du stab (là aussi, c'est un mythe qui a la vie dure).

➤ le centrage résulte de la répartition de toutes les surfaces de l'appareil : ailes, stab, mais aussi fuselage, flotteurs, etc. (exactement comme une girouette).

➤ il n'y a pas un point de centrage unique, mais une plage allant de la limite avant (qui est une question de capacité de la (ou des) gouverne(s) de profondeur d'assurer la manœuvrabilité en tangage) à la limite arrière (qui est le centrage neutre, appelé aussi foyer aérodynamique ou « neutral point » en anglais).

➤ dans cette plage acceptable, il y a une plage sensiblement plus réduite qui donne un bon compromis entre agrément de pilotage et stabilité.

Le plus important à comprendre réside dans :

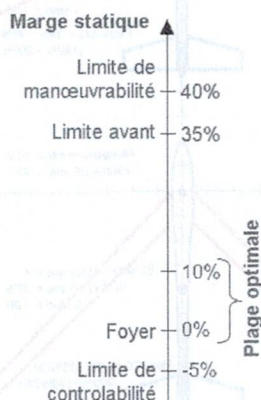
➤ la notion de girouette : l'avion se comporte autour de son CG de la même manière qu'une girouette (ayant la même forme projetée sur un plan horizontal) autour de son axe de pivot, dont la position détermine la stabilité. C'est plus qu'une analogie, car l'utilisation d'une girouette à la forme de l'avion étudié a été une technique largement utilisée il y a quelques années pour déterminer expérimentalement son centrage.

➤ en conséquence, toutes les surfaces devant le CG (ou l'axe de pivot de la girouette) sont déstabilisantes, tandis que les surfaces derrière ce point sont stabilisantes : plus l'appareil présente de surface à l'avant (canard par ex.) et plus le centrage correct se trouvera vers l'avant de l'appareil, et inversement.

➤ tout se joue autour de la notion de foyer : c'est le point précis auquel la girouette est neutre, elle reste à l'incidence à laquelle on la place, sans revenir dans le vent (stable) ou sans amplifier l'incidence de départ (instable). C'est donc le point à partir duquel on quantifie le centrage. Comme le rappelle Pierre Rousselot [ici](#) : « La seule condition, pour qu'un avion, quelle que soit sa formule, soit stable, est qu'il soit centré en avant de son foyer général. Toutes les autres soi-disant explications ne sont que des discours partiels, ou inexacts ; la vérité étant beaucoup plus simple, mais jamais facile à comprendre, car il faut, auparavant, balayer les idées fausses. Je le sais, j'y suis passé ! ».

Là aussi, je ne ferai ici aucune démonstration, les publications ne manquant pas (voir bibliographie), juste un rappel : sauf cas particuliers et relevant d'un mauvais design (en particulier des profils et/ou un état de surface inadaptés aux Reynolds et un fuselage ou des ailes trop souples), le foyer un point fixe ! Beaucoup confondent les notions de foyer et de centre de poussée et c'est une erreur qui rend les choses incompréhensibles. En effet, le centre de poussée est mobile, il se balade

en vol jusqu'à en dehors de l'aile (ce qui, il faut l'admettre, n'est pas simple à comprendre...), et ne peut pas servir de référence au centre de gravité, qui lui est fixe. Chaque élément a son propre foyer : l'aile (qui, par définition, est la plus grande voilure porteuse) et le stab, à 25% de leur corde moyenne, mais aussi le fuselage ou toute autre surface de l'avion (nacelle moteur, flotteur, etc.). La composition de tous ces foyers individuels donne le foyer de l'avion, et c'est à partir de ce dernier qu'on positionne le centrage. Généralement, la plage de centrage d'un avion ressemble à cela (ici pour un traîné) :



La marge statique définit le taux de stabilité en tangage et est exprimée en % de la corde moyenne de l'aile. La limite avant (« avant » s'entend : CG devant le foyer) dépend principalement du stab : plus il est grand et loin en arrière de l'aile et plus la plage de marge statique admissible devient importante, et inversement. Dans cette logique, une aile volante ou un canard ont donc une plage de centrage acceptable bien plus réduite que celle d'un planeur oldtimer à grand stab. Par contre, la plage optimale est à peu

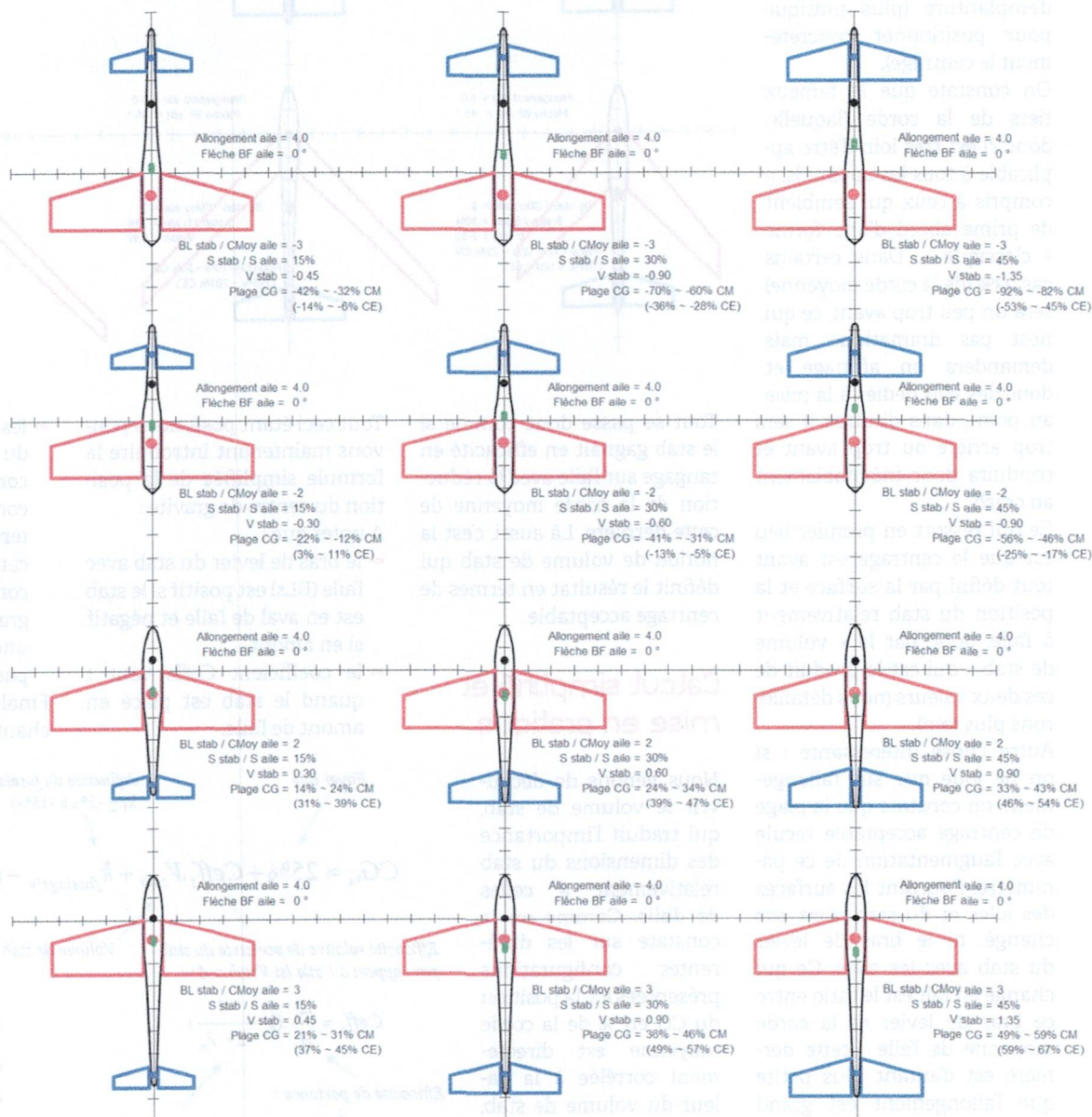
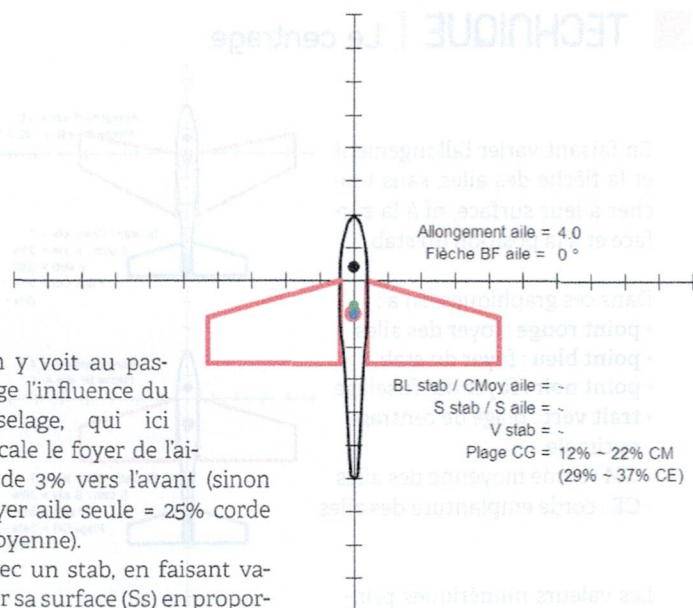
près la même sur tous les appareils, et va du centrage neutre à environ 10% de marge statique. Le CG peut se trouver quelques % derrière le foyer, on parle alors de « centrage arrière », mais le pilotage devient très vite délicat et le vol se fait « sur des œufs » car l'appareil est instable et accentue le moindre ordre.

Si on met cela en pratique avec quelques simulations faisant varier judicieusement les paramètres influents pour représenter les principales configurations géométriques, on trouve ce genre de choses (en vue de dessus) :

Tout d'abord l'aile volante, qui n'est qu'un cas particulier ($V_{stab} = 0$) du principe général :

On y voit au passage l'influence du fuselage, qui ici décale le foyer de l'aile de 3% vers l'avant (sinon foyer aile seule = 25% corde moyenne).

Avec un stab, en faisant varier sa surface (S_s) en proportion de la surface des ailes (S_a) et sa position (BL_s) en proportion de la corde moyenne des ailes (CM_a), le fuselage étant adapté en conséquence :



En faisant varier l'allongement et la flèche des ailes, sans toucher à leur surface, ni à la surface et à la position du stab :

Dans ces graphiques, on a :

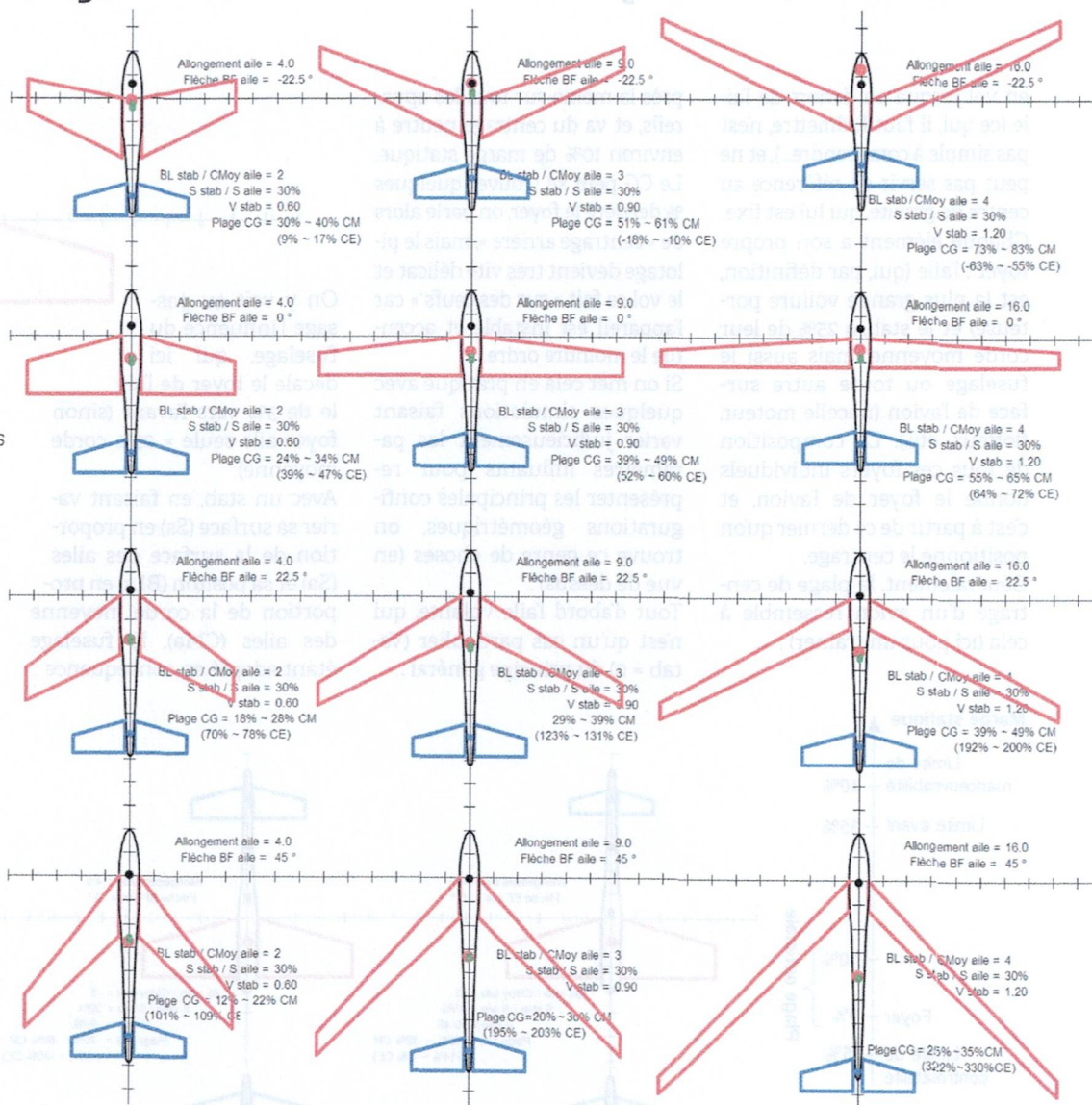
- **point rouge** : foyer des ailes
- **point bleu** : foyer du stab
- **point noir** : foyer du fuselage
- **trait vert** : plage de centrage optimale
- **CM** : corde moyenne des ailes
- **CE** : corde emplanture des ailes

Les valeurs numériques principales sont indiquées à côté du dessin de chaque configuration, dont la plage de centrage exprimée en % de la corde moyenne des ailes (la seule qui ait un sens aérodynamique) et en % de la corde d'emplanture (plus pratique pour positionner concrètement le centrage).

On constate que le fameux tiers de la corde (laquelle, donc ?) est très loin d'être applicable à tous les appareils, y compris à ceux qui semblent de prime abord d'une forme « classique ». Dans certains cas, 33% (de la corde moyenne) sera un peu trop avant, ce qui n'est pas dramatique mais demandera un affinage et donc des vols dédiés à la mise au point, dans d'autres il sera trop arrière ou trop avant et conduira donc inévitablement au crash.

Ce qui ressort en premier lieu est que le centrage est avant tout défini par la surface et la position du stab relativement à l'aile, donc par le « volume de stab » qui est le produit de ces deux valeurs (nous détaillerons plus loin).

Autre chose intéressante : si on ne joue que sur l'allongement, on constate que la plage de centrage acceptable recule avec l'augmentation de ce paramètre. Pourtant les surfaces des ailes et du stab n'ont pas changé, ni le bras de levier du stab avec les ailes. Ce qui change en fait est le ratio entre ce bras de levier et la corde moyenne de l'aile : cette dernière est d'autant plus petite que l'allongement est grand (pour une surface donnée), et donc le ratio est alors d'autant plus grand, et inversement.



Tout se passe donc comme si le stab gagnait en efficacité en tangage sur l'aile avec la réduction de la corde moyenne de cette dernière. Là aussi, c'est la notion de volume de stab qui définit le résultat en termes de centrage acceptable.

Calcul simplifié et mise en pratique

Nous venons de découvrir le volume de stab, qui traduit l'importance des dimensions du stab relativement à celles de l'aile. Comme on le constate sur les différentes configurations présentées ici, la position du CG en % de la corde moyenne est directement corrélée à la valeur du volume de stab, et c'est cela LE principe qu'il faut retenir pour comprendre le centrage.

Tout ceci étant posé, nous pouvons maintenant introduire la formule simplifiée de la position du centre de gravité :

A noter que :

- le bras de levier du stab avec l'aile (BLs) est positif si le stab est en aval de l'aile et négatif si en amont.
- le coefficient C_{eff} vaut 1 quand le stab est placé en amont de l'aile.

les dimensions des ailes et du stab (envergure, surface, corde d'emplanture) sont considérées hors zone d'intersection avec le fuselage, cette zone étant considérée comme faisant partie intégrante de ce dernier (sauf une exception : les ailes en position « parasol »).
Finalement, rien de bien méchant...

$$CG_{\%} \approx 25\% + C_{eff} \cdot V_{stab} + k_{fuselage} - ms_{\%}$$

$CG_{\%}$: Centre de gravité en % de la corde moyenne
 25% : Marge statique
 C_{eff} : Efficacité relative de portance du stab par rapport à l'aile (si $V_{stab} > 0$)
 V_{stab} : Volume de stab
 $k_{fuselage}$: Influence du fuselage : $k_f \approx -5\% \text{ à } -15\%$
 $ms_{\%}$: Marge statique : 0% : voltige, 5% : usage classique, 10% : très stable
 $C_{eff} \approx \frac{A_z}{A_a} \cdot (1 - \frac{4}{2 + \lambda_a})$
 $A_{voilure}$: Surface de la voilure
 $\lambda_{voilure}$: Allongement de la voilure
 $Perte d'efficacité du stab dans la déflexion de sillage de l'aile (Munk)$
 $V_{stab} = \frac{BL_2 \cdot S_a}{CM_{A_2} \cdot S_z}$
 $\lambda = \text{allongement} = \frac{\text{Envergure}^2}{\text{Surface}}$
 CM_{A_2} : corde moyenne aile
 BL_2 : levier foyer stab à foyer aile

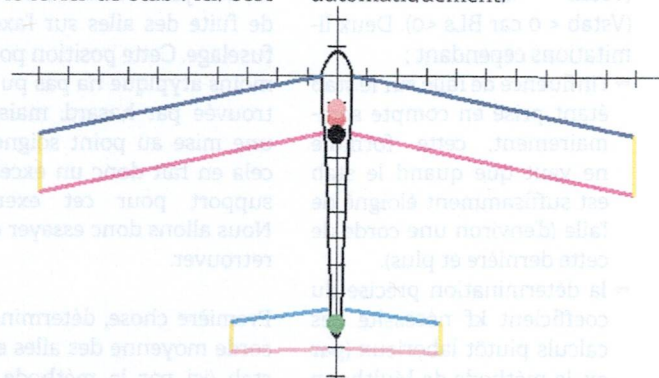
Le résultat calculé correspond parfaitement à l'indication du plan, c'est presque magique, non ? Attention cependant de ne pas tomber dans l'enthousiasme béat : si le calcul simplifié que nous venons d'utiliser donne le premier ordre de grandeur de manière très satisfaisante, sa précision n'est pas pour autant parfaite. On peut l'estimer à environ +/- 5% de corde moyenne, mieux dans certains cas (fuselages fin par ex.) et moins bien dans d'autres (fuselages gros, stab très proche des ailes par ex.). Pour un calcul plus fin, je vous

propose d'utiliser le logiciel **PredimRC**, qui prend compte des formes d'ailes complexes, calcule le coefficient Kf de la majorité des formes de fuselage et intègre bien d'autres effets, comme la position verticale du stab sur la déflexion de sillage de l'aile et l'interaction entre le fuselage et les voilures. Ce logiciel permet aussi de vérifier, entre autres choses, les calages des ailes et du stabilisateur.

Même si la version lite suffit amplement quand il s'agit de calculer le centrage, j'ai utilisé ici la version complète qui per-

met pas mal de vérifications supplémentaires. On notera que les valeurs à saisir (en bleu) sont les mêmes que celles utilisées pour le calcul simplifié, sauf le levier de stab : ici, c'est

celui entre les bords d'attaque des ailes et du stab qui est utilisé car mesurable directement, le levier de foyer à foyer (752 mm ici) étant ensuite calculé automatiquement.



Aile

(mm)	Trapèze 1	Trapèze 2	Trapèze 3	Trapèze 4	Trapèze 5
Corde emplant.	215	-	-	-	-
Corde saumon	215	-	-	-	-
Longueur	940	-	-	-	-
Flèche /BA	220	-	-	-	-
Vrillage (*)	0.0	-	-	-	-
Dièdre (*)	0	-	-	-	-

Surface totale (dm²)	40.42
Corde moyenne (mm)	215.0
Envergure aéro (mm)	1880
Envergure totale (mm)	1955
Allongement	8.74
Allongement ellip.	11.11
Foyer aile (mm)	163.8

Stabilisateur

(mm)	Trapèze 1	Trapèze 2	Trapèze 3	Trapèze 4	Trapèze 5
Corde emplant.	145	-	-	-	-
Corde saumon	110	-	-	-	-
Longueur	320	-	-	-	-
Flèche /BA	50	-	-	-	-
Levier stab	860	Hauteur stab	0	Profil	Asymétrique fin
Ouverture (*)	--- / 180	Ecart latéral	15	Dérive(s) (dm²)	4.0

Surface totale (dm²)	8.16
Corde moyenne (mm)	128.3
Envergure aéro (mm)	640
Allongement	5.02
Allongement ellip.	5.61
Foyer stab (mm)	55.9
Bras de levier (mm)	752
Volume de stab	0.71

Fuselage

Longueur (mm)	1050	Largeur (mm)	75	Forme	Caisse arrondie
Levier nez (mm)	85	Hauteur (mm)	110	Poutre	Normale
Position aile	haute	Incidence liée	aile	Sac (dm²)	0.0 Mixte

Surface mouillée (dm²)	32.0
Surface projetée (dm²)	5.5
Foyer fuselage	20%

Le résultat est le suivant (référentiel = bord d'attaque de l'aile à son emplanture) :

- centrage neutre (marge statique = 0%) : 56% de la corde moyenne de l'aile, soit 230 mm.
- centrage normal (marge statique = 5%) : 51% de la corde moyenne de l'aile, soit 220 mm.
- centrage avant (marge statique = 10%) : 46% de la

corde moyenne de l'aile, soit 210 mm.

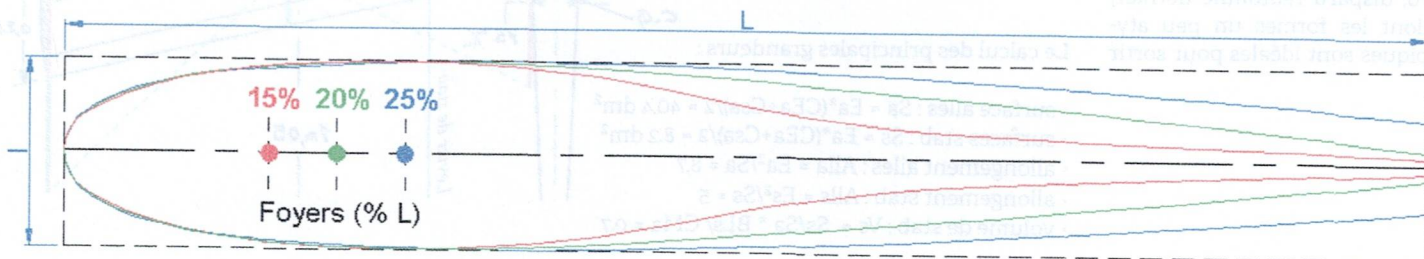
Comme déjà identifié par la méthode simplifiée, la plage de centrage calculée ici correspond parfaitement au plan du Choucas, alors que le sempiternel centrage au tiers de la corde n'aurait pas du tout été adapté. On pourra aussi déduire que le plan du Choucas propose un centrage plutôt neutre, ce qui est typique d'un planeur de vol

de pente correctement mis au point.

Un mot au passage sur la modélisation du fuselage dans **PredimRC** : contrairement à la méthode de Multhopp, par exemple, qui découpe le fuselage en plusieurs petits éléments de surface, l'approche retenue consiste à résumer le fuselage à ses dimensions principales (longueur totale et largeur du maître-couple) et une

forme (en vue de dessus) choisie au plus proche de l'appareil étudié parmi trois formes prédéfinies (tracés en rouge, vert et bleu ci-dessous).

Cela fait donc seulement trois paramètres au total, plus la position du fuselage par rapport aux ailes, ce qui est autrement plus simple qu'une modélisation détaillée tout en donnant des résultats très proches.



Cette formule est universelle, elle vaut pour TOUS les types d'appareils, y compris les formules exotiques type tandem ($V_{stab} = 0$) et les canards ($V_{stab} < 0$ car $BLs < 0$). Deux limitations cependant :

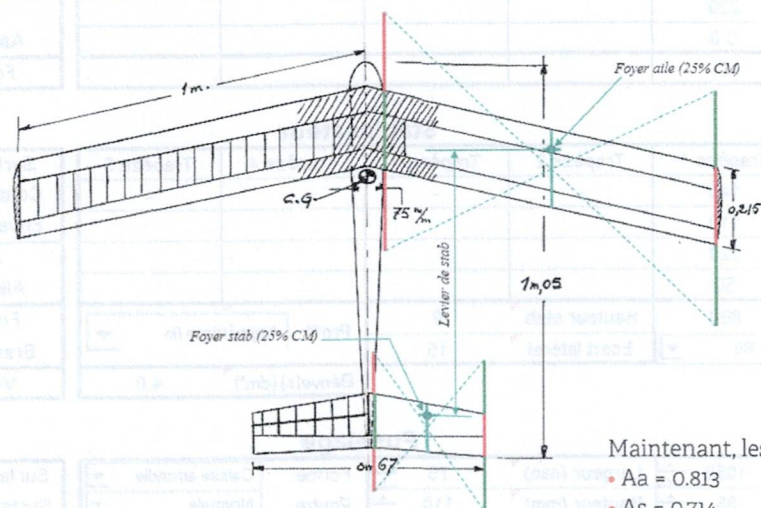
- l'influence de l'aile sur le stab étant prise en compte sommairement, cette formule ne vaut que quand le stab est suffisamment éloigné de l'aile (d'environ une corde de cette dernière et plus).
- la détermination précise du coefficient k_f nécessite des calculs plutôt laborieux (par ex. la méthode de Multhopp NACA TM1036 ou de Gilruth NACA TR711), en particulier dans le cas de fuselage imposant et complexe (jet, etc.). Ici, en se limitant à des fuselages pas trop exotiques, nous utiliserons une valeur de 10% pour un fuselage de forme et position classiques, 5% pour un fuselage avec un nez (partie devant l'aile) très court et 15% pour un nez très allongé. Attention, faute de les calculer formellement, ce sont des valeurs arbitraires, donc avec une certaine marge d'incertitude.

Il existe d'autres formules simplifiées, toutes construites sur le même raisonnement, comme la formule de Lapresle, mais elles ont généralement l'inconvénient d'utiliser des valeurs d'efficacité de portance et d'influence du fuselage fixées à l'avance, ce qui les cantonne à des appareils de géométrie conventionnelle.

Une application pratique va nous permettre de nous roder un peu. Pour cela, j'ai choisi le mytique Choucas de Robert Bardou (un grand monsieur du modélisme, aux créations prolifiques qui ont inspiré bien de modélistes et l'un des principaux pionniers du vol de pente en France dans les années 60-70, disparu l'automne dernier) dont les formes un peu atypiques sont idéales pour sortir

définitivement du mauvais réflexe du « centrage au tiers de la corde » : (cf schéma ci-contre) La position du centrage déterminé par l'auteur à l'époque se trouve juste derrière le bord de fuite des ailes sur l'axe du fuselage. Cette position pour le moins atypique n'a pas pu être trouvée par hasard, mais par une mise au point soignée, cela en fait donc un excellent support pour cet exercice. Nous allons donc essayer de la retrouver.

Première chose, déterminer la corde moyenne des ailes et du stab (ici par la méthode graphique du report des cordes) puis y positionner le foyer (au quart avant de cette corde) : (cf schéma ci-dessous)

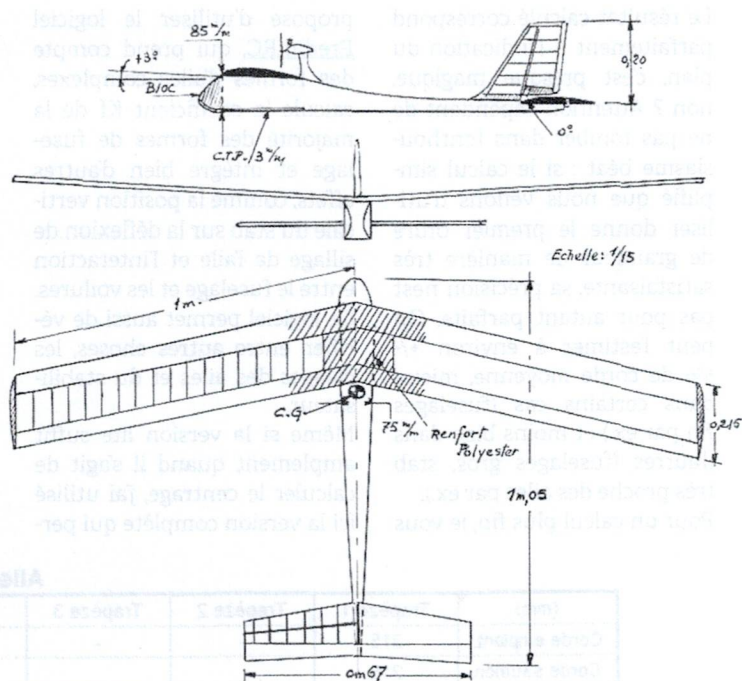


Relevons les principales dimensions :

- envergure aéro ailes : $Ea = 1880$ mm
- envergure aéro stab : $Es = 640$ mm
- corde emplanture aile : $CEa = 215$ mm
- corde saumon aile : $CSa = 215$ mm
- corde emplanture stab : $CEs = 145$ mm
- corde saumon stab : $CSs = 110$ mm
- corde moyenne ailes : $CMa = 215$ mm
- bras de levier stab : $BLs = 752$ mm

Le calcul des principales grandeurs :

- surface ailes : $Sa = Ea \cdot (CEa + CSa) / 2 = 40.4$ dm²
- surfaces stab : $Ss = Es \cdot (CEs + CSs) / 2 = 8.2$ dm²
- allongement ailes : $Alla = Ea^2 / Sa = 8.7$
- allongement stab : $Alls = Es^2 / Ss = 5$
- volume de stab : $Vs = Ss / Sa \cdot BLs / CMa = 0.7$



Maintenant, les coefficients :

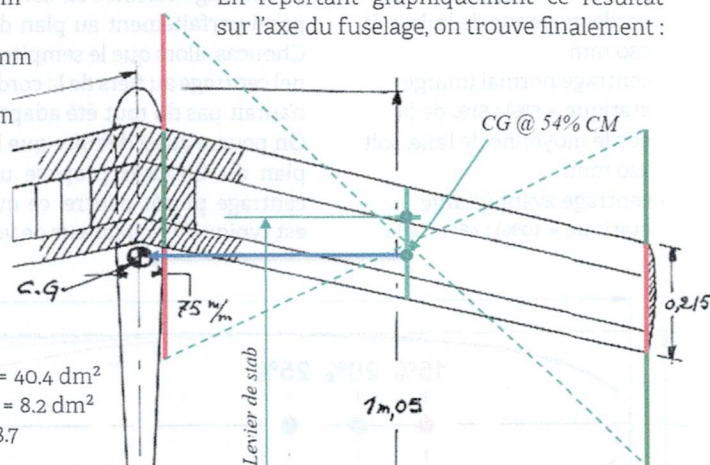
- $Aa = 0.813$
- $As = 0.714$
- $Ceffs = 0.55$
- $k_f = 5\%$ (nez court)
- $ms = 5\%$ (par défaut)

D'où :

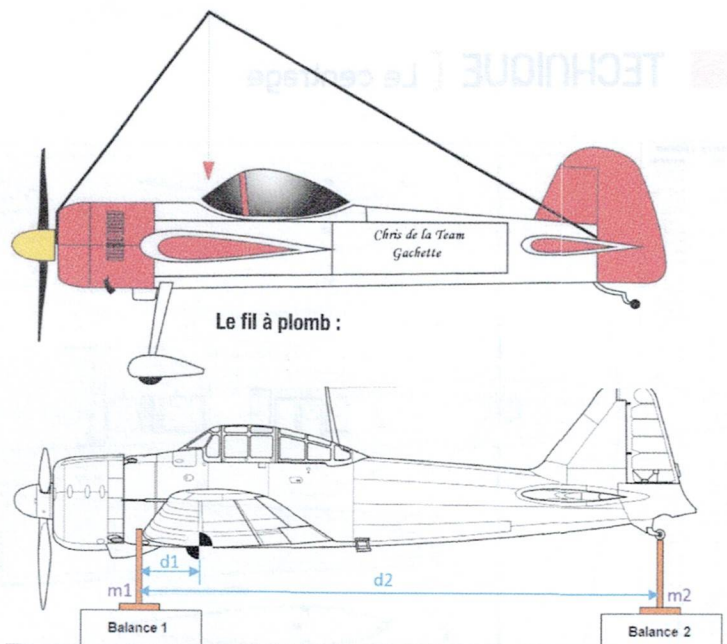
$$CG = 25\% + 0.55 \cdot 0.7 - 5\% - 5\% = 54\%$$

(de la corde moyenne des ailes)

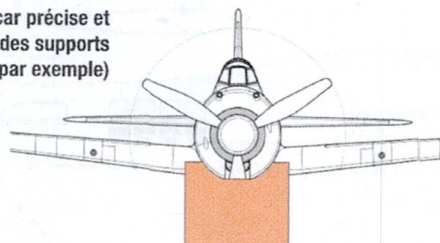
En reportant graphiquement ce résultat sur l'axe du fuselage, on trouve finalement :



le cas, on déplace l'accu ou on ajoute du plomb en conséquence. Cette méthode souffre d'une certaine imprécision en règle générale, en particulier sur les petits modèles où un % de corde moyenne se chiffre en mm plutôt qu'en cm, et ne convient pas non plus aux gros modèles. On lui préférera donc les méthodes suivantes.



Et la méthode de la pesée, qui a ma préférence car précise et utilisable pour tous les appareils en réalisant des supports adaptés (en polystyrène extrudé par exemple)



Une seule balance (de cuisine par ex.) est nécessaire, il suffit de faire la mesure en deux temps (avec une cale à la place de la balance pour le second point, de manière à garder le modèle parfaitement horizontal).

Cette dernière méthode est indirecte, elle nécessite un petit calcul (d_1 et d_2 sont mesurés au centre des supports) :

Position CG : $d_1 = d_2 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)$

Ce calcul, ainsi que celui du plomb de centrage à utiliser pour positionner le CG au bon endroit, ont été automatisés sur le fichier excel ci-contre

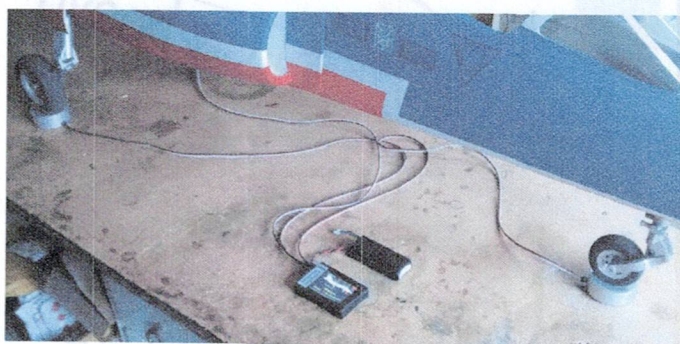
Lien (voir en bas de page) :

<http://rcaerolab.eklablog.com/predimrc-p1144024>

Autre outil similaire :

<https://www.rudyv.be/Modelisme/CG/CG.htm>

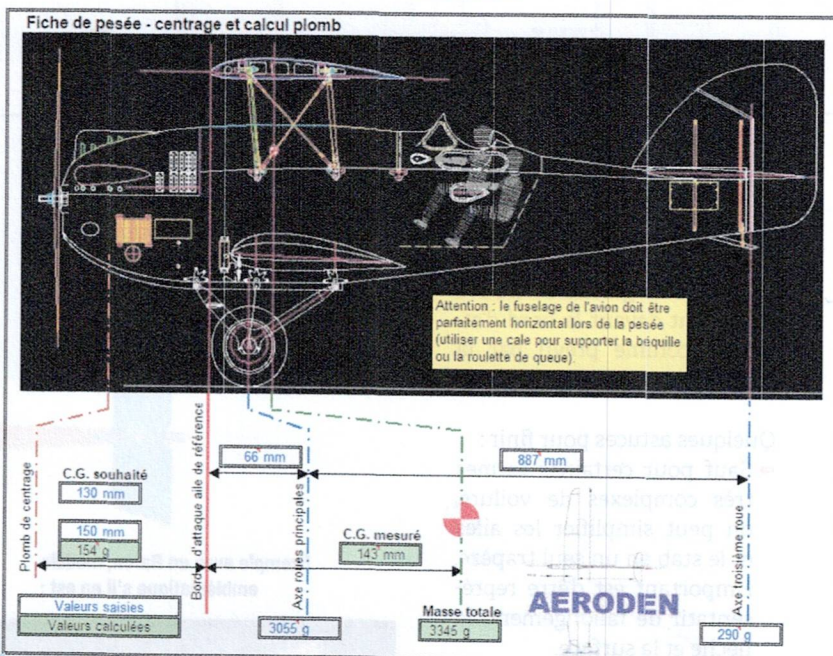
La méthode de la pesée est aussi implémentée dans des outils dédiés, comme par exemple chez Xicoy (CG meter) ou à réaliser soi-même avec un Arduino :



Liens :

<https://www.xicoy.com/catalog/index.php?cPath=57&language=fr>

<https://www.modelisme.com/forum/aero-techniques/207703-diy-mesure-cg-laide-3-jauges-contrainte-4.html#post2699736>

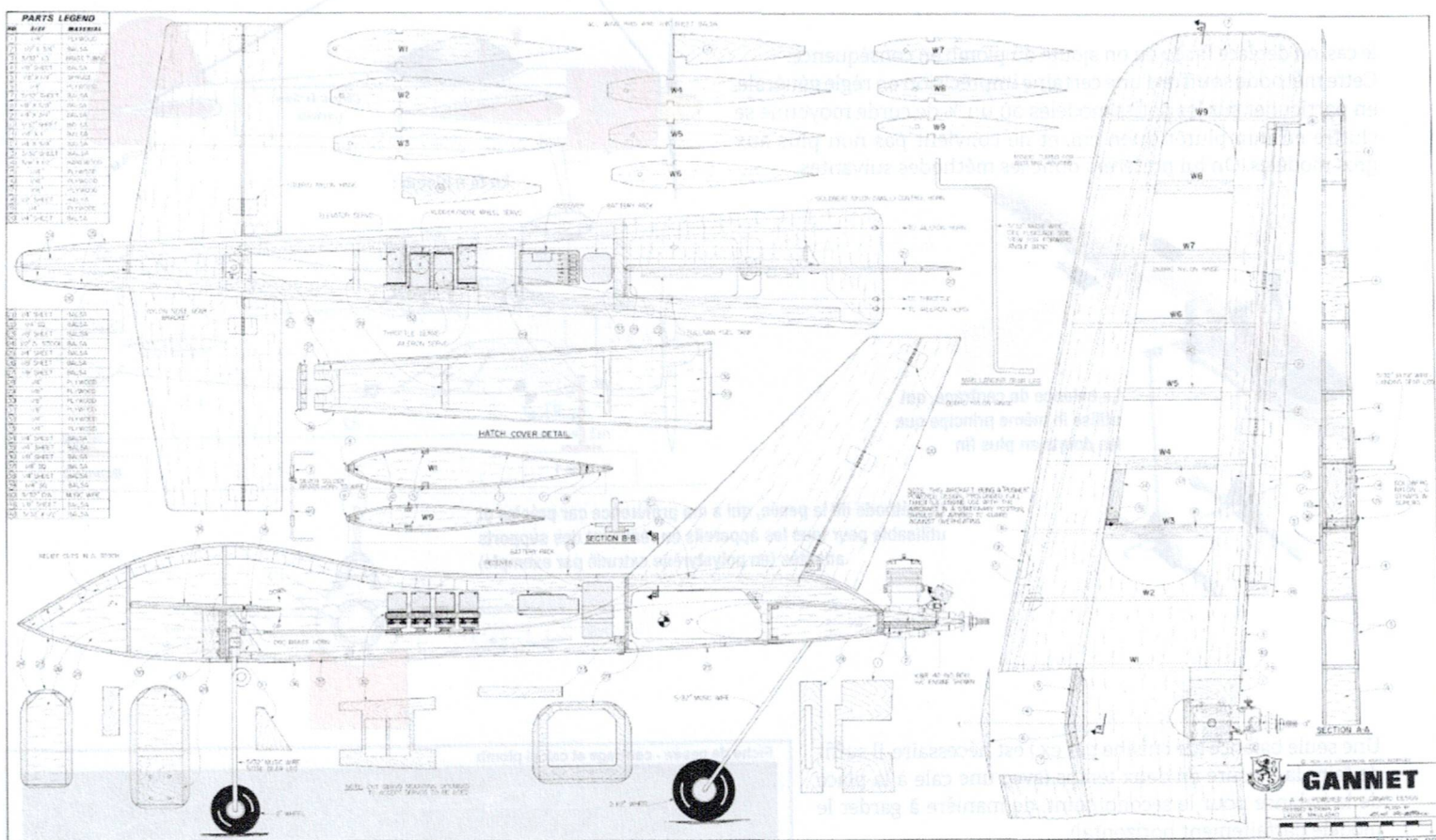


Quelques critères d'analyse du vol

Le centrage n'étant qu'un réglage parmi bien d'autres, voici comment bien différencier les différents contributeurs au comportement de l'axe de tangage (centrage, débattement de profondeur et/ou élévons, calage de profondeur, calage des ailes) :

— si l'avion ou le planeur a tendance à partir tout le temps dans le même sens, que ce soit à piquer ou à cabrer : c'est un problème de calage de stab (donc de Vé longitudinal), ou de calage d'élé-

vons sur une aile volante, à corriger dans les deux cas avec le trim de profondeur. Dit autrement : un avion ne cabre pas parce qu'il est « trop léger de l'avant » mais parce qu'il est trop cabreur (et inversement). Problème qu'on ne résout donc pas en plombant le nez (donc en avançant le centrage), mais en mettant du piqueur ! Cela semble tellement évident, et pourtant... Après réglage, l'appareil doit voler droit naturellement (manches totalement lâchés). La gouverne ne sera plus forcément alignée avec le plan fixe (et cela



Pour continuer à se faire la main, ci-dessus un autre exemple de centrage non trivial (à vous de jouer !). Le centre de gravité se trouve largement devant le bord d'attaque... comme prévu par la théorie !

La prise de cote peut être faite sur tous supports : le modèle, son plan, un croquis, et même une photo si elle est prise bien à la normale du plan horizontal.

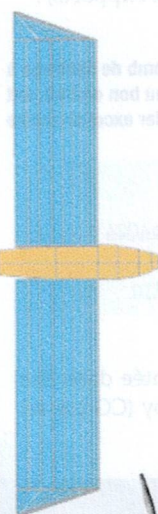
Quelques astuces pour finir :

Sauf pour certaines formes très complexes de voilure, on peut simplifier les ailes et le stab en un seul trapèze, l'important est d'être représentatif de l'allongement, la flèche et la surface.

Marge statique	5%	÷
CG	38.0%	94.4
Foyer	43.0%	106.2

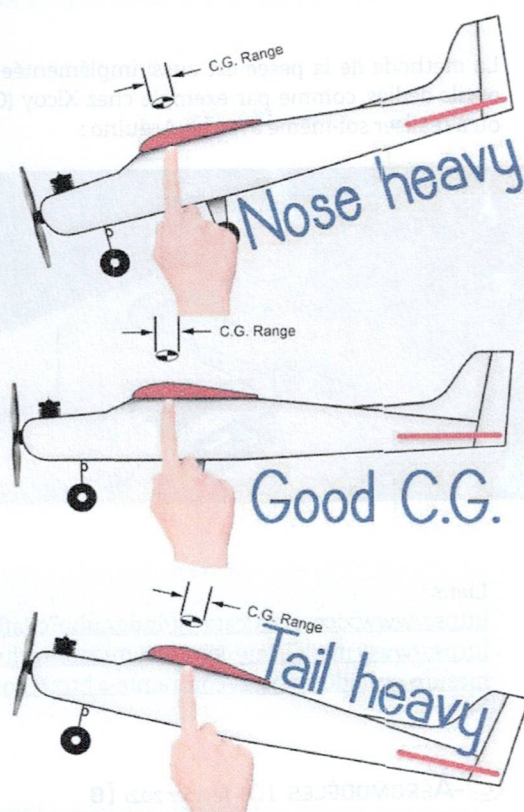


Exemple avec un Baron, modèle emblématique s'il en est :



Régler le centrage en pratique

La première méthode est celle que tout le monde connaît : on pose le modèle sur le bout des doigts au niveau du point de centrage souhaité, et on vérifie qu'il tient en équilibre de manière horizontale. Si ce n'est pas



d'autant que le calage initial était faux), cela n'a aucune importance ; même si c'est de manière importante ni les qualités de vol ni les performances ne sont affectées.

- ➔ si l'avion est vif au manche mais, une fois ce dernier relâché (le trim de profondeur étant réglé) conserve sa trajectoire (centrage neutre) ou a tendance à revenir à une trajectoire naturelle (centrage avant) : c'est un problème de débattement de profondeur, à réduire (et inversement si c'est trop mou). Pour rappel, $\pm 10^\circ$ de débattement est une valeur classique quand le centrage est correctement réglé.
- ➔ si l'avion est très vif au manche et accentue chaque changement de trajectoire (comportement divergent, qu'on identifie par ex. au test du piqué) une fois le manche lâché, et cela indifféremment dans les deux sens (donc après un ordre à piquer et après un ordre à cabrer) : le centrage est arrière.
- ➔ si l'avion conserve la trajectoire (quelle qu'elle soit) et ne nécessite pas de correction en fonction de l'allure, y compris

pris en vol dos ou après une prise de badin : le centrage est neutre.

- ➔ si l'avion nécessite à la fois un soutien continu pour voler lentement et/ou une action continue à piquer pour voler au badin (ou plein gaz pour un avion) et un fort soutien à piquer en vol dos, ainsi qu'un débattement à la profondeur sensiblement plus important que le $\pm 10^\circ$ classique : le centrage est trop avant.
- ➔ un vol « ondulant » manches lâchés est aussi un symptôme possible d'un centrage trop avant, mais aussi d'une souplesse excessive de l'appareil ou des commandes ou d'un jeu dans ces dernières : cela nécessite donc de ne pas interpréter trop catégoriquement ce comportement.
- ➔ et, pour finir, si l'avion se comporte parfaitement mais, aux allures normales, vole trop « queue haute » ou trop « queue basse » : c'est uniquement un problème de calage d'aile [par rapport au fuselage], à augmenter pour relever la queue (et inversement), en conservant le Vé longitudinal (donc en recalant le stabilisateur d'autant que l'aile).

Trois rappels essentiels :

- ➔ les effets du centrage ne peuvent être observés que si l'appareil vole droit manches lâchés, donc que si le trim de profondeur a été réglé.
- ➔ le comportement de l'axe de tangage doit toujours être observé en plané ou, quand cela n'est pas possible, avec le moteur réduit au plus juste pour tenir le palier, de manière à ne pas polluer le résultat par les effets d'un angle moteur incorrect (angle à régler en second temps).
- ➔ le comportement au décrochage n'est pas un critère d'analyse, car dépendant avant tout de la forme de l'aile et son profil. Les réglages en tangage ne contribuent qu'à le moduler : avancer le centrage et réduire le débattement de la profondeur « retardent » par exemple la survenue du décrochage et donnent donc l'impression de l'améliorer, mais en réalité ne le change pas fondamentalement. Faut-il rappeler une évidence, un problème se règle à la source, et pas en le camouflant par un « patch » plus ou moins adapté, avec le risque d'engendrer d'autres effets pervers.

En la suivant à lettre, c'est une méthode de discrimination très efficace qui permet de régler la grande majorité des problèmes de mise au point de l'axe de tangage ; le restant, généralement engendré par des erreurs de conception (profil inadapté aux Reynolds en jeu, mauvais choix de vrillage, de taille de stab, etc.) et/ou des problèmes structurels (souplesse et jeu de gouverne / commande, déformation de poutre de queue, de voilure, etc.), ne peut pas être résolu de manière satisfaisante par les réglages et nécessite d'autres corrections (voir par ex. [ici](#)), voire l'utilisation d'un système de stabilisation électronique.

Pour conclure

En espérant que ce papier vous a apporté un nouvel angle de vue sur la problématique du centrage et éclairé un peu (voire réconcilié avec ?) cet éternel sujet de débat aéromodéliste, je vous souhaite de bons vols... avec des appareils bien réglés !

Franck Aguerre

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

Bibliographie

Aéromodélisme :

- <http://www.charlesriverrc.org/articles/supergee/CGMarkDrela.htm>
- http://pierre.rondel.free.fr/images2/tp_centrage/index.htm
- <https://scherrer.pagesperso-orange.fr/matthieu/aero/papers/centrage.pdf>
- <http://rcaerolab.eklablog.com/centrage-perfos-et-ressenti-p1674598>
- <http://rcaerolab.eklablog.com/bien-comprendre-les-tests-de-centrage-p2868508>
- http://www.hq-modellflug.de/theory%20contributions/longitudinal_flight_stability.pdf
- <http://www.modelaviation.com/dealingwithcg>
- <https://rcplanes.online/index5.htm>
- <https://rcaerobase.ipjdev.co.uk/index.php/2-uncategorised/48-visualising-neutral-point-and-static-margin>

Aviation grandeur

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Stabilit%C3%A9_longitudinale_d%27un_avion
- https://en.wikipedia.org/wiki/Longitudinal_static_stability
- <http://aerodesign.stanford.edu/aircraftdesign/AircraftDesign.html>
- <http://www.aerodynamics4students.com/aircraft-performance/weight-and-balance.php>
- <http://ato.cnvv.net/www/FIE/file/Manuels/chargement-et-centrage-du-planeur.pdf>
- http://acversailles.free.fr/documentation/06-Notices_Techniques/007-Determination-des-limites-de-centrage.pdf
- https://www.acat-toulouse.org/uploads/media_items/masse-et-centrage-1.original.pdf
- <http://pouduciel.free.fr/trucs&astuces/stabilite-balligand.html>
- <http://inter.action.free.fr/publications/stabilite/stabilite.html>

Livres mécanique du vol modèle réduit

RC Aero Design (F. Aguerre) : <https://ffam.vendredi-13.fr/librairie/16-rc-aero-design.html>

Model aircraft Aerodynamics (M. Simons) : <https://www.amazon.fr/Model-Aircraft-Aerodynamics-Martin-Simons/dp/1854862707/>