



Par **MICHEL BARRY**,
pilote professionnel,
ingénieur aéronautique.

Centrage arrière non maîtrisé

LE CENTRAGE ARRIÈRE NE S'IMPROVISE PAS. LES DEUX ACCIDENTS MORTELS RÉCENTS PRÉSENTÉS ICI SONT DUS A PRIORI POUR L'UN À UN CHARGEMENT MAL ÉQUILIBRÉ ET POUR LE SECOND À UNE ERREUR DE CONCEPTION DE L'APPAREIL.

Les accidents provoqués par un centrage trop arrière sont la plupart du temps dramatiques, ils se terminent en général par une perte de contrôle de l'appareil. Du simple centrage arrière qui rend l'appareil trop sensible à la profondeur et à la direction, au centrage excessivement arrière,

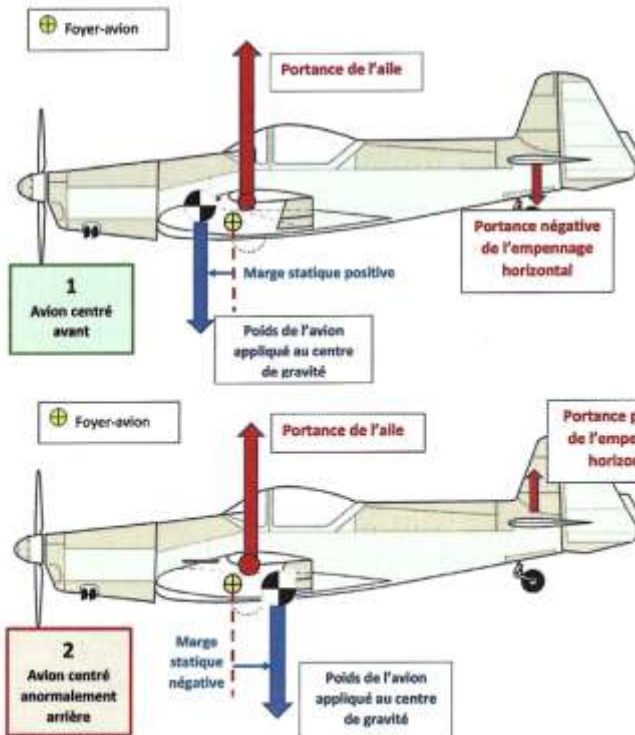
plus arrière que le « foyer avion », il existe une gradation de la dangerosité. On passe ainsi d'un avion excessivement manœuvrable, agréable à piloter, à un appareil impossible à contrôler et, tôt ou tard, voué à l'accident. Les pilotes d'appareils certifiés sont protégés par les consignes données par le constructeur dans le manuel de vol et ils devront s'efforcer de

charger leur appareil conformément aux limites de centrage (avant et arrière) qui y sont indiquées. Les constructeurs amateurs doivent, soit respecter les limites imposées par le concepteur, soit travailler sérieusement la question avec des experts s'ils se déclarent eux-mêmes concepteurs ou s'ils modifient un appareil existant.

Nous avons traité un sujet voisin dans notre numéro 769 d'avril 2020. Depuis deux accidents, dont les rapports BEA, viennent de paraître. Ils illustrent les dangers d'un centrage trop arrière. Un premier accident dû probablement à un chargement trop arrière, un deuxième accident dû à une erreur de conception sur un prototype. A destination plus particulière de nos amis constructeurs amateurs, nous développerons ce deuxième accident et évoquerons les erreurs d'interprétation de la mécanique du vol et surtout des essais en vol conduits par du personnel non suffisamment compétent.

Figure 1. Équilibre simplifié des forces et des moments d'un avion en vol.

Le même avion peut être centré plutôt avant ou plutôt arrière. Dans les deux cas, les schémas représentent des équilibres statiques mais ne laissent pas présumer de la nature de l'équilibre dynamique. A noter dans le cas n°2, la nécessité d'avoir l'empennage porteur (portance positive) car la disposition relative du centre de gravité par rapport au point d'application de la portance de l'aile produit un moment piqueur. La portance de l'empennage neutralise statiquement ce moment.



A. Accident d'un avion DR400, le 12 septembre 2020, à Arcachon - La Teste-de-Buch (33)

Voir lien #1 surnotre site

Un pilote peu expérimenté entreprend un vol en DR400-120 avec deux passagers plutôt corpulents à bord et les pleins de carburant. La masse maxi au décollage est dépassée d'environ 50 kg et surtout le centrage est très arrière, voire en dehors de l'enveloppe du constructeur. Le décollage est plus long que d'habitude (500 mètres après le point d'alignement) et s'effectue avec une variation d'assiette importante. L'avion n'accélère alors plus, probablement au second régime de vol, et ne parvient que difficilement à prendre de la hauteur. Le pilote perd le contrôle, l'avion décroche alors qu'il a atteint une hauteur d'une soixantaine de pieds et s'écrase au sol. Les trois passagers sont tués dans le choc. Le pilote décédera pendant sa prise en charge par les secours.

Sur la plupart des quadriplaces de nos aéroclubs le dépassement de la masse maxi va de pair avec un centrage arrière. La difficulté pour réussir un décollage dans ces conditions est double.

- 1. L'allongement de la distance de roulement et la difficulté à monter après l'envol simplement à cause de la perte de performances liée à la masse.
- 2. La difficulté à piloter un appareil centré plus arrière que d'habitude, devenu extrêmement sensible à la profondeur, et nécessitant de ce fait une habileté particulière pour afficher correctement les paramètres de montée (vitesse, assiette). Dans ce cas la proximité du sol incite le pilote à plutôt tirer sur le manche car il s'aperçoit très vite que le moindre déplacement provoque des oscillations en tangage importantes. Pourtant une assiette moins forte qui produirait une incidence plus faible est la seule possibilité pour diminuer la traînée et retrouver la portance qui est en train de diminuer dangereusement. Mais la solution est difficile à trouver pour un pilote qui rencontre la situation pour la première fois.

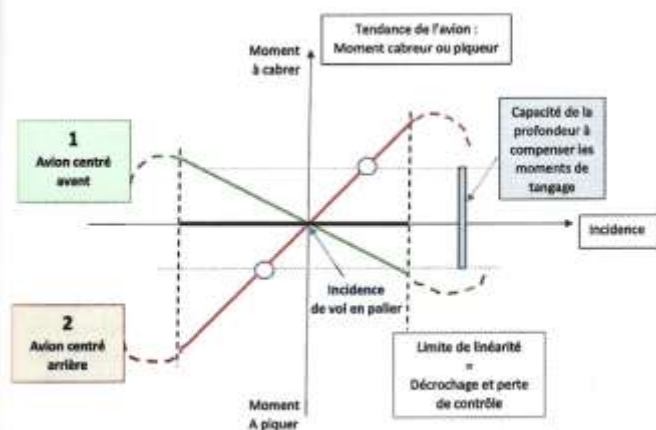


Figure 2. Tendance à cabrer ou à piquer selon deux positions du centre de gravité.

1. Si l'avion est centré normalement avant (courbe en vert, marge statique positive), toute augmentation accidentelle d'incidence entraîne une tendance à piquer, donc un retour vers l'incidence initiale. Même principe pour toute diminution. L'équilibre dynamique est stable car l'appareil tend à retrouver une incidence (et une vitesse) d'équilibre. Le pilote n'a en principe pas besoin de corriger.

2. Si l'avion est centré anormalement arrière (courbe en rouge, marge statique négative), toute augmentation accidentelle d'incidence entraîne une tendance à cabrer encore davantage. Si le pilote n'intervient pas immédiatement, en appliquant un moment à piquer grâce au gouvernail de profondeur, l'incidence continue d'augmenter ainsi que la tendance qui la fait augmenter. Une fois l'incidence critique atteinte l'appareil décroche. Si le pilote intervenait trop tard alors que le moment à cabrer a dépassé le moment maximum possible donné par le gouvernail de profondeur, la perte de contrôle serait inévitable. Le pilote impuissant verrait l'appareil cabrer sans qu'il ne puisse agir. Sa vigilance devrait être extrême car il devrait corriger en permanence.

Même si en toute rigueur un appareil peut être contrôlé longitudinalement, alors qu'il est centré très arrière, l'action du pilote comme on va le voir plus loin est de plus en plus difficile et nécessite des corrections fréquentes et de faibles amplitudes. Si l'avion est centré plus en arrière qu'un point appelé « foyer-avion », la tâche est quasi impossible.

B. Accident d'un prototype Bachoffer BA-01, le 15 août 2019, à Pamiers-Les Pujols (09)

Voir lien #2 sur notre site

L'accident du prototype d'un avion de voltige, inspiré des appareils du concepteur-voltigeur de haut niveau Luis Peña, mérite d'être l'objet d'une communication, à la fois vis-à-vis des constructeurs amateurs mais aussi des pilotes qui volent sur des appareils certifiés. Ici, la copie était dès le départ affectée d'un grave défaut. Cet accident illustre une méconnaissance trop fréquente de la mécanique du vol : les lois de l'équilibre longitudinal des avions à architecture classique.

Elles exigent de satisfaire à un certain nombre d'équilibres instantanés :

- 1. La résultante aérodynamique, décomposée en portance et en traînée, doit équilibrer le poids de l'avion et les forces de propulsion : équilibre des forces.
- 2. La somme des moments de ces différentes forces autour du centre de gravité de l'avion doit être nulle : équilibre des moments.
- 3. En vol stabilisé, la position du centre de gravité par rapport à un

point fixe de l'avion, son « foyer-avion » (ou point neutre), conditionne la nature de l'équilibre :

3.1 Centre de gravité en avant du foyer-avion : équilibre stable. Si on lâche le manche, l'avion conserve son incidence ou retrouve naturellement une incidence d'équilibre.

3.2 Centre de gravité confondu avec le foyer-avion : équilibre indifférent. Si on lâche le manche, l'avion conserve son incidence.

3.3 Centre de gravité en arrière du foyer-avion : équilibre instable. Si on lâche le manche, soit l'avion augmente son incidence jusqu'au décrochage ou, soit au contraire elle diminue jusqu'à partir en piqué. Seule une action active permanente de correction de la part du pilote permettrait de conserver une incidence constante. Mais piloter un tel appareil est difficile, voire impossible. Si l'incidence augmente ou au contraire diminue au-delà de certaines valeurs, le pilote ne rétablira pas la situation. Il s'agit du scénario de l'accident, le pilote n'ayant pas réussi à contrer une action intempestive à cabrer (figure 2).

C. L'équilibre longitudinal des appareils classiques (empennages et gouvernails à l'arrière)

1. Les deux points qui conditionnent l'équilibre du vol - le centre de gravité et le foyer-avion - sont indépendants.

• **Le centre de gravité de l'avion :**

il dépend seulement de ses masses et de leur répartition longitudinale (masse de l'avion à vide, masse des passagers, masse des bagages, masse du carburant). On peut dans une certaine mesure modifier leur position au cours du chargement et ainsi agir sur la position du centre de gravité.

• **Le foyer-avion :** il dépend uniquement des surfaces de l'avion : l'aile, l'empennage horizontal, et à un niveau moindre le fuselage et les appendices non rétractables. Le foyer-avion est quasiment fixe même si les gouvernes et les volets sont manœuvrés. Il est d'autant plus arrière que l'empennage horizontal a une surface importante et un bras de levier important. Sur la plupart des appareils de nos aéroclubs il se situe entre 35 % et 50 % de la corde moyenne de l'aile. En moyenne 40 %.

2. L'équilibre longitudinal : deux natures d'équilibre distinctes et indépendantes.

Voir Info-Pilote n°777 de décembre 2020, figures 7 et 8. Nous rappelons l'essentiel des résultats.

• **L'équilibre statique (fig. 1) :**

un objet immobile ou animé d'un mouvement uniforme est par définition en équilibre statique. Un avion en croisière représente bien cette forme d'équilibre.

Deux conditions :

- toutes les forces qui lui sont appliquées

Vé longitudinal : environ -6° quand le plan fixe réglable de l'empennage est au neutre

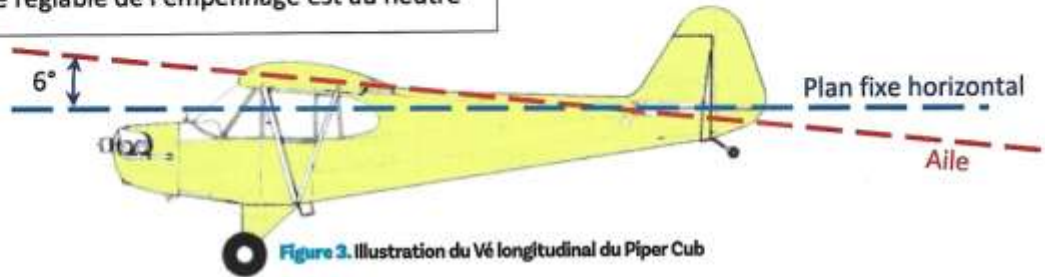


Figure 3. Illustration du Vé longitudinal du Piper Cub

s'annulent ou admettent une résultante nulle ;

- tous les mouvements autour de ses axes d'inertie (tangage en ce qui nous concerne ici, roulis ou lacet) sont nuls.

• **L'équilibre dynamique et la marge statique (figure 1) :** un avion peut parfaitement voler, équilibré statiquement, mais à la moindre perturbation il présentera des comportements différents. En mécanique du vol, on distingue quatre formes de réponses à une perturbation en tangage pour un appareil en équilibre statique. Elles conditionnent des lois de comportement parmi les plus déterminantes en matière de sécurité et de qualités de vol. Elles sont un compromis entre la stabilité et la manoeuvrabilité. L'équilibre dynamique longitudinal donc les quatre formes évoquées ci-dessus sont exclusivement dépendantes de la position relative entre le foyer-avion et le centre de gravité. La distance qui sépare les deux points sur l'avion s'appelle la marge statique. Elle s'exprime en mètres

ou en pourcentage de la corde moyenne de l'aile.

Elle est positive si le centre de gravité est en avant du foyer-avion :

- **centre de gravité très en avant du foyer-avion :** marge statique de $+20$ à $+30\%$. Avion très stable, voire hyperstable, peu manoeuvrant. Après une perturbation il retrouve rapidement son incidence, sans oscillation. L'équilibre dynamique est assuré ;

- **centre de gravité modérément en avant du foyer-avion :** marge statique de $+5$ à $+20\%$. Après une perturbation, il subit quelques oscillations en tangage (phugoïde) et finit par retrouver son incidence initiale. Après atténuation des oscillations on considère que l'équilibre dynamique est assuré ;

- **centre de gravité confondu avec le foyer-avion :** marge statique nulle. Après une perturbation en tangage l'appareil conserve l'écart d'incidence. Il ne s'amplifie pas, il ne s'atténue pas. L'équilibre dynamique est indifférent ;

- **centre de gravité en arrière du foyer-avion :** marge statique négative. Après une perturbation, sans action corrective immédiate du pilote, l'avion peut partir à cabrer ou à piquer avec des accroissements ou des diminutions d'incidence qu'il est impossible ensuite de rattraper par l'action de la profondeur : c'est la perte de contrôle. L'avion est d'autant plus instable que le centre de gravité est arrière et le phénomène est d'autant plus irréversible. L'équilibre dynamique n'est pas assuré.

3. Cas de l'accident du prototype du § B.

Comme il s'agit d'un biplace en tandem à vocation voltige, il est logique que le concepteur de l'avion accidenté ait plutôt privilégié la manoeuvrabilité que la stabilité. En s'inspirant du biplace Peña Bilouis, appareil de construction amateur parfaitement conçu, développé et réglé par son concepteur Luis Peña, le pilote accidenté avançait en terrain bien défriché. Mais pour quelques centimètres de distance du mauvais côté du foyer-avion, il a volé dès le départ, comme le démontre le rapport du BEA, avec un appareil centré en arrière du foyer-avion. Des témoignages antérieurs de pilotes, y compris celui du pilote accidenté, rapportent d'ailleurs « un avion instable en profondeur ». En plus de l'instabilité, il est noté une tendance à cabrer qui s'explique par la position plus arrière du centre de gravité.

• **Le calage relatif des plans (aile, empennage horizontal) :** un appareil centré correctement, en avant du foyer-avion, vole en palier équilibré avec son empennage horizontal déporteur (portance dirigée vers le bas), figure 1-1. Cette « déportance » est nécessaire pour compenser le couple piqueur provoqué par le centre de gravité en avant du foyer-avion, ce dernier très proche en vol en palier du point d'application de la portance de l'aile. Ainsi vous remarquerez que le calage du plan horizontal de vos avions est toujours plus faible (plus piqueur) que celui de l'aile. On parle de « Vé longitudinal » que nos

amis aéromodélistes découvrent très tôt sous peine de ne pas réussir à obtenir un vol stable sur leurs planeurs non-radiocommandés. **Figure 3.**

Réciproquement, tout appareil qui volerait en palier avec un Vé longitudinal positif (calage de l'empennage supérieur à celui de l'aile) révélerait un centrage beaucoup trop arrière. Dans le cas de l'appareil accidenté, le Vé longitudinal était de l'ordre de 5 à 6° alors que les appareils semblables volent plutôt avec -1 à -2°.

• **Les erreurs de mise au point :**

- **d'abord au sol :** le BEA note une grossière erreur de détermination de la position du centre de gravité. La fiche de pesée indique un centrage à vide à 29 % de la corde moyenne, valeur parfaitement compatible avec les qualités de vol recherchées pour cet appareil dont l'exemplaire de référence admet un centrage maximum arrière à 36 %. Malheureusement l'enquête, à partir des relevés de masses lors de la pesée notamment sur la roulette arrière (63 kg au lieu de 33 à 36 kg sur les appareils du même type), confirme l'hypothèse d'un centrage bien trop arrière estimé en vol à environ 50 % ;

- **ensuite en vol :** lorsqu'on identifie un appareil franchement instable lors d'un vol d'essai, on remercie d'abord le ciel de pouvoir en parler et on arrête immédiatement l'avion. Mais la plupart du temps des deux symptômes – tendance à cabrer, instabilité –, on retient celui qui paraît le plus facile à corriger par le calage de la profondeur. Ici le réglage du plan fixe horizontal. On pense ainsi régler un défaut de centrage par un effet aérodynamique. Mais l'instabilité ne disparaît pas. Et avec l'instabilité le risque de dépasser, au cours des variations d'assiette, volontaires ou intempestives, une incidence que l'autorité de l'empennage ne pourra plus contrôler. On va vers le décrochage ou le passage sur le dos. Dans le cas présent, le scénario

d'une montée volontaire, mais que le pilote n'aurait pu stopper, est caractéristique de la perte de contrôle d'un appareil instable.

D. Recommandations, conseils

• **1.** Pour les appareils certifiés, donc pourvus d'un manuel de vol, apprenez à calculer la position du centre de gravité, au décollage puis tout au cours du délestage en carburant pendant le vol. Certains appareils peuvent en effet être correctement centrés au départ, mais devenir, ou centrés plus avant, ou centrés plus arrière en consommant leur carburant. Vérifiez que cette position est contenue dans la marge imposée par le constructeur.

• **2.** Pour les appareils certifiés il est en principe inutile de connaître la relation entre les limites de centrage, notamment arrière, et le foyer-avion. On respecte les limites du centrogramme et on est protégé. Cependant il est toujours intéressant de se situer par rapport au foyer-avion, ne serait-ce que pour anticiper le comportement de l'avion.

• **3.** La limite arrière de centrage imposée par le constructeur peut également provenir des essais de vrille. Notamment pour la sortie de vrille, après essais en vol, l'exigence de limite de centrage arrière est parfois plus sévère que celle découlant des critères de stabilité longitudinale.

• **4.** Pour les appareils de construction amateur deux cas de figure :

- soit il s'agit d'un appareil construit d'après une liasse dessinée après les essais du prototype. Le constructeur propriétaire de la liasse doit alors respecter les limites indiquées par le concepteur. Attention, chaque constructeur personnalise ensuite un peu son appareil, notamment au niveau des équipements. Il devra lors de la pesée vérifier que son chargement futur pourra bien rester dans les limites de centrage imposées par le concepteur ;

- soit il s'agit d'une liasse modifiée ou d'un réel prototype. Si on n'a pas la compétence pour déterminer la position du centre de gravité la plus raisonnable, on se fera aider d'un spécialiste. En général, on démarra les essais en vol autour de 25 % de la corde, une moyenne sur les prototypes d'architecture classique. Mais ce n'est pas une règle dès que la formule s'en écarte (par exemple les avions canards).

• **5.** Les deux exemples d'accidents mortels de ce mois-ci montrent bien que dépasser une limite de centrage arrière, soit légèrement (cas du DR400), soit exagérément (cas du prototype BA-01), peut provoquer des comportements d'appareils difficiles à contrôler. Parfois certains pilotes s'adaptent à des avions instables avec une certaine habileté comparable à celle du jongleur qui tient la perche verticale en équilibre grâce à d'imperceptibles et permanents mouvements de correction. Mais ils ignorent l'épée de Damoclès que représente un dépassement accidentel des écarts (incidence pour le pilote, angle vertical de la perche pour le jongleur) et face auxquels leur habileté sera impuissante. ●