



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

LES QUALITÉS DE VOL DES AVIONS LÉGERS : STANDARDISATION ET DISPARITÉS

SUJET EN LIEN DIRECT AVEC LA SÉCURITÉ, LES QUALITÉS DE VOL DES AVIONS LÉGERS SI ELLES SONT LE FRUIT DE COMPROMIS MÉCANIQUES ET FINANCIERS DE L'AVIONNEUR N'EN DEMEURENT PAS MOINS DES CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DE CHACUN D'ENTRE EUX. TOUR D'HORIZON DES EXIGENCES REQUISES PAR LES CERTIFICATIONS ET REMARQUES SUR LES DIFFÉRENCES DE COMPORTEMENT D'APPAREILS IDENTIQUES.

Notre rubrique est en première ligne pour déplorer les accidents récents qui nous ont tous touchés de près ou de loin :

- une collision en vol entre un DR400 et un ULM,
- un accident en montagne avec un DR400,
- un accident près de l'aérodrome avec un DR400,
- un accident en approche avec un Cirrus...

Nous ne manquerons pas dès que le BEA aura publié les résultats des enquêtes de vous en informer afin que nous puissions en tirer les leçons et éviter à notre tour de nous trouver confrontés, volontairement ou involontairement, à des situations qui peuvent virer mal en quelques secondes. Mais nous craignons bien que des événements très semblables n'aient déjà été examinés dans notre rubrique et que nos remarques ne soient qu'un copier-coller des précédentes rubriques.

Aussi, ce mois-ci, nous traiterons un sujet simplement documentaire, en lien direct avec la sécurité, et qui concerne une question qui revient très souvent : les qualités de vol de nos avions légers. Comment sont-elles déterminées ? Nos appareils possèdent-ils tous de bonnes qualités de vol ? Quelles sont les exigences réglementaires imposées par la base de certification choisie par le constructeur (CS-VLA, CS-22, CS-23, CS-LSA ...) ? Autant de questions pertinentes auxquelles nous essayons dans les lignes qui suivent d'apporter une réponse.

Nous décrivons les différents items abordés lors de la certification de l'avion, destinés à atteindre un niveau de sécurité suffisant, afin que l'appareil puisse être mis entre les mains de tous les pilotes. Les commandes de vol et gouvernes (A), la stabilité de l'avion, liée au dessin de sa cellule (B) sont les résultats de compromis mécaniques et financiers de l'avionneur. Même si elles restent dans une enveloppe commune, les qualités de vol sont de ce fait des caractéristiques spécifiques de chaque type d'appareil.

A. Commandes de vol et gouvernes.

Critères de manœuvrabilité

Selon que l'avion soit plutôt rustique et peu coûteux ou, au contraire, soit techniquement plus évolué, il ne présentera pas le même agrément dans le maniement des commandes de vol. Mais le même niveau de sécurité sera atteint et en principe aucun appareil certifié ne présentera un danger pour un pilote qualifié et « sans habileté particulière ».

1. Caractéristiques et exigences ergonomiques demandées aux constructeurs : ni trop ni trop peu !

Elles sont parfaitement réglementées par les exigences de certification

et leur respect contribue largement à l'agrément du pilotage. De même une certaine homogénéité en effort (notamment efforts du même ordre de grandeur sur les 2 axes commandés par le manche ou le volant) est considérée comme une qualité de vol.

1.1 Les lois d'efforts.

En cabine le pilote manœuvre des commandes. Essentiellement un manche à balai ou un volant et des pédales (ou palonnier). On exige pour la manœuvre de ces deux organes des caractéristiques dynamométriques qui vont contribuer aux qualités de vol :

- Un niveau d'effort raisonnable, ni trop fort, ni trop faible. Il est défini pour chaque type

d'appareil par des valeurs qui permettent à tous les pilotes, quelle que soit leur force physique et la longueur de leurs bras et jambes, de braquer à fond la gouverne manœuvrée. Pour les efforts maximums, voir tableau, **figure 1**.

- Autre exigence : afin que les pilotes trop nerveux ne braquent pas impulsivement les commandes on définit les efforts minimums grâce à la loi « Efforts par g ». Elle stipule que les efforts à appliquer ne soient pas inférieurs à une valeur définie et qui augmente avec le facteur de charge. Par exemple en CS-VLA, le constructeur lors des essais de certification « ... doit montrer par des mesures en vol que l'effort au manche par « g » est tel que l'effort au manche

Figure 1. Efforts maximums appliqués aux commandes pour les appareils les plus courants dans nos aéroclubs.

Efforts maximums appliqués aux commandes. Exemple CS-VLA et CS-23 CS-VLA, avions très légers moins de 750 kg (CS-VLA 143)

Valeur en Newton de l'effort appliqué aux commandes (10 N = 1 kg force)	Tangage	Roulis	Lacet	Autres (volets, compensateurs, train...)
a) Pour application momentanée				200
• Manche	200	100		
• Volant (appliqué à la couronne)	250	200		
• Pédale de direction			400	
b) Pour application prolongée	20	15	100	

CS-23, avions de moins de 5 670 kg (CS-23.143)

Valeur en Newton de l'effort appliqué aux commandes (10 N = 1 kg force)	Tangage	Roulis	Lacet
c) Pour application momentanée			
• Manche	267	133	
• Volant (appliqué à la couronne)	334	222	
• Pédale de direction			667
d) Pour application prolongée	44,5	22	20

pour réaliser le facteur positif de charge de manœuvre limite n'est pas inférieur à 7 daN (7kg force) par augmentation de 1g dans la configuration propre. » (JAR-VLA 155). Par exemple pour un appareil compensé en croisière, volant donc à 1 g, et limité à 4,4 g, il faudrait appliquer au manche (à cabrer) au minimum $7 \text{ daN} \times (4,4 \text{ g} - 1 \text{ g}) = 23,8 \text{ daN}$ (238 N ou 23,8 kf force) pour atteindre le facteur de charge limite de 4,4 g

1.2 Les imperfections des commandes de vol nuisent aux qualités de vol.

Des commandes de vol idéales ont les qualités suivantes :

- une rotation ou un coulissement sans frottements exagérés ;
- une loi d'effort qui croît progressivement autour d'un neutre ;
- un retour au neutre quand la commande est libre. Ce neutre peut être ou non décalé par la manœuvre des compensateurs ;
- un retour d'effort qui doit traduire les forces aérodynamiques sur la gouverne manœuvrée ;
- une absence de jeu.

Le manche ou les pédales agissent sur les gouvernes (gouverne de profondeur et ailerons pour le manche, gouverne de lacet pour les pédales) grâce à des organes de transmission essentiellement mécaniques pour les petits avions. Câbles et poulies ou bielles et rotules. Souvent un assemblage des deux technologies. Ces organes introduisent des imperfections dans le fonctionnement que le constructeur se doit de minimiser : frottements, inerties, élasticités. Il existe des critères objectifs (élasticités mesurables) ou subjectifs (inertie, frottements), ces derniers dépendant de l'évaluation faite par les équipages d'essais. Moins les imperfections seront sensibles et plus l'appareil aura des commandes de vol considérées comme agréables. Elles appa-

raîtront alors subjectivement efficaces et contribueront à une caractéristique importante des qualités de vol. Par exemple un appareil dont la commande d'ailerons est dure à cause d'une tension trop importante dans un câble d'aileron semble perdre son efficacité en roulis.

1.3 Trois exemples courants d'imperfection.

1.3.1. Des frottements dans la chaîne de commande : câbles trop tendus ou axes mal lubrifiés ou bielle(s) frottant sur la structure...

Figure 2.

1.3.2. Un jeu trop important au voisinage du zéro : câbles mal tendus, rotules usées, axes de gouvernes ovalisés... **Figure 3.**

1.3.3. Les gouvernes ont un débattement parfaitement lié à la position de la commande, mais leur efficacité est mauvaise, voire nulle au voisinage du zéro. **Figures 4 et 5.**

Un problème de conception dans le dessin de la gouverne qui ne « mord » pas au voisinage du neutre puis qui retrouve brutalement son efficacité dès qu'on dépasse une certaine amplitude. On remédie à ce défaut en épaississant les bords de fuite et parfois toute la gouverne. Voir certains avions de voltige comme le Dyn'Aéro CR100 qui a intégré dès la conception des gouvernes légèrement débordantes.

2. Efficacité des gouvernes. Synthèse des critères généralement retenus lors des essais en vol d'avions légers.

(D'après « Essais en vol », par Pierre Bonneau et Christian Briand, Ed. Air-Press, ISBN 2-9501875-2-8) Sur les appareils trois axes classiques il est demandé aux gouvernes un minimum d'efficacité sur l'axe qu'elles contrôlent, tout en ayant un minimum d'influence (effet secondaire) sur les autres axes. L'homogénéité évoquée pré-

Figure 2. Frottements dans la chaîne de commande. Exemple du roulis.

Dans le sens positif des efforts, par exemple manche à droite pour la chaîne de roulis, il faut déjà exercer un effort seuil avant de commencer à braquer les ailerons. Ensuite, pour un certain braquage, il faut continuer à exercer un effort plus important qu'il ne le serait avec une chaîne sans frottements (courbe idéale, pointillés orange). Ensuite selon que l'effort ait augmenté ou diminué (sens des flèches), il existe 2 niveaux d'effort (1 et 2) qui correspondent au même braquage, ce qui nuit à la précision du pilotage, donc aux qualités de vol.

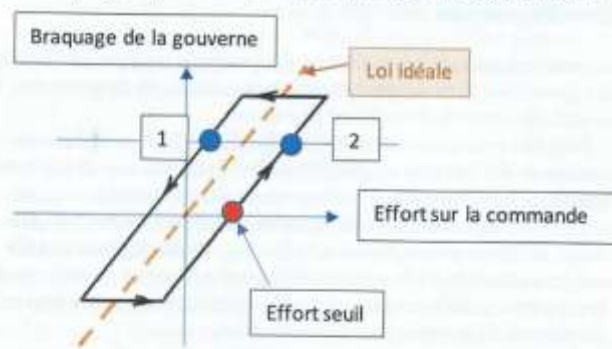


Figure 3. Jeu dans la chaîne de commande. Exemple du roulis.

Au voisinage du neutre, entre deux positions latérales du manche 1 et 2, le braquage des ailerons peut se situer entre les 2 points a et b. Ou n'importe où à l'intérieur du quadrilatère en bleu (ci-dessous). Une imprécision qui nuit à la précision du pilotage pour les petites amplitudes, notamment à grande vitesse. Une fois le jeu rattrapé, pour les grandes amplitudes, la commande semble fonctionner normalement. Mais, à chaque fois que l'on repasse par le neutre, le défaut se manifeste.

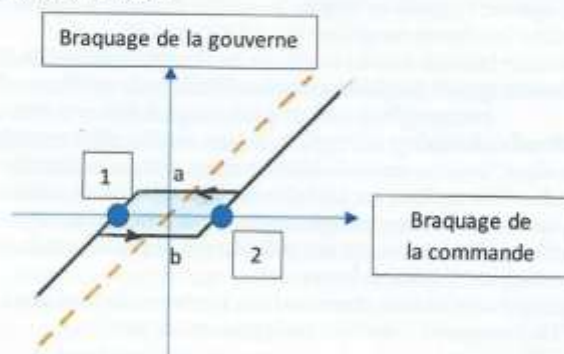
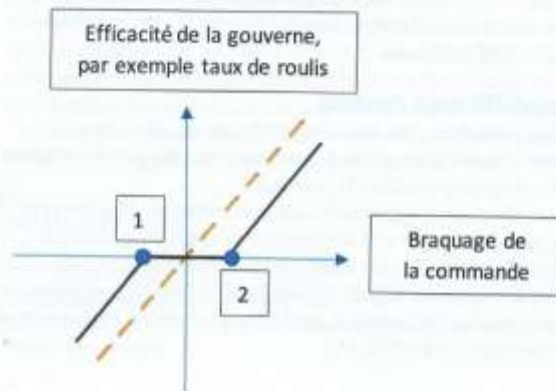


Figure 4. Manque d'efficacité de la gouverne autour du zéro.

Entre les braquages 1 et 2, la gouverne, bien que manœuvrée, ne produit aucun changement de portance du plan sur lequel elle est articulée. Ici, exemple des ailerons. Le phénomène est dû au fait qu'elle ne trouve de l'efficacité que si elle sort de l'épaisseur de la couche limite, développée depuis le bord d'attaque du plan. Là où elle rencontre un écoulement plus actif.



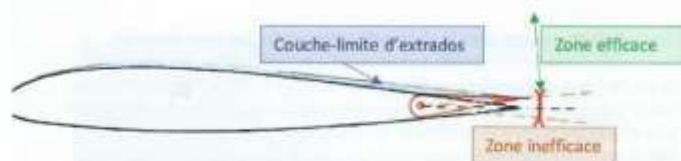


Figure 5. Pour de faibles débattements (zone inefficace), la gouverne rencontre un écoulement sans énergie (couche limite) et son efficacité est amoindrie, voire nulle.

cédemment pour les lois d'effort est également de mise pour l'efficacité des gouvernes. Rien ne servirait d'avoir un contrôle en tangage très réactif si le contrôle en roulis est paresseux.

Pour être reconnue comme une qualité de vol, l'efficacité des commandes de vol doit être adaptée à la nature de l'avion. Sur un avion de voltige, un taux de roulis de 360° par seconde sera considéré comme une qualité. Sur un avion-école, le même taux de roulis serait un handicap : avion top pointu pour son utilisation. Ainsi le législateur a dû rédiger en matière d'efficacité des exigences qui tout en tenant compte de ces particularités constituent un dénominateur commun à tous ceux qui relèvent de la même base de certification.

Les gouvernes et leurs débattements doivent être suffisants pour permettre à l'appareil de décoller, de croiser, de descendre et d'atterrir, tout en étant capable d'évoluer à l'intérieur du domaine de vol que le constructeur a défini. La liste des exigences est longue. Nous allons retenir les principales :

2.1. Efficacité en tangage.

- Lever la queue à $0,8 \text{ VS}$ (train classique). Lever la roulette de nez à $0,85 \text{ VS}$ (train tricycle).
- Compenser l'appareil en tangage (possibilité de lâcher le manche) pour toutes les vitesses comprises entre $1,3 \text{ VSO}$ et $1,4 \text{ VSI}$.
- Exécuter l'arrondi dans les conditions les plus pénalisantes : avion lourd et au centrage avant maximum.

2.2. Efficacité en roulis.

Au décollage, l'avion, compensé à $1,2 \text{ VS}$ en virage, doit pouvoir « rouler » de 30° d'inclinaison d'un côté à 30° d'inclinaison de l'autre, de manière à inverser le sens du virage en moins de 5 secondes. En configuration approche, à $1,3 \text{ VS}$, le temps est de 4 secondes pour passer de 30° incliné d'un côté, à 30° incliné de l'autre côté.

On demande aussi à l'avion d'avoir un lacet inverse modéré de façon à ce qu'il soit compensé facilement par la gouverne de lacet.

2.3. Efficacité en lacet.

De plus en plus on demande à la gouverne de lacet de simplement pouvoir rétablir la symétrie du vol (bille au milieu) au cours de toutes les manœuvres, notamment en virage, à basse vitesse et lors des décrochages. Même si le roulis induit par la gouverne de lacet seule est une action secondaire plutôt bénéfique, on demande qu'il ne soit pas trop prononcé. Ce qui est le cas sur la plupart des avions modernes. L'évaluation de l'efficacité en lacet est laissée à l'appréciation des pilotes d'essais qui certifient l'avion.

B. La stabilité de l'avion

Les critères précédents, liés aux commandes de vol, définissent la manœuvrabilité de l'avion. C'est-à-dire l'ensemble des possibilités dont dispose le pilote pour modifier la trajectoire.

Mais lors de vols rectilignes stabilisés, en montée, en croisière et en descente, et même lors de vols stabilisés en virage, il est souhaitable que l'appareil conserve le plus longtemps possible et sans trop de corrections la trajectoire initiale. Et surtout si elle échappe au pilote, ce dernier doit pouvoir facilement la rétablir « sans habileté particulière ». (Stabilité statique CS-23.173 à 177)

On demande aussi à l'avion qui entre accidentellement en oscillation (turbulence, manœuvre inappropriée du pilote) d'amortir naturellement les oscillations. (Stabilité dynamique CS-23.181)

On demande enfin à l'avion de pouvoir se sortir d'un décrochage et d'une vrille. (CS-23.203 à 221)

1. Stabilité longitudinale statique. CS-VLA et CS-23.175. Figure 6.

Elle dépend essentiellement de la géométrie de l'avion et de son centrage. Dans toutes les configurations – montée, croisière, approche et atterrissage –, la CS-23 (de même que la CS-VLA) stipule que « ... la courbe des efforts au manche doit avoir une pente stable... ». Traduisez que pour stabiliser des vitesses variables dans tout le domaine de vol usuel, le manche doit être d'autant plus en position avant que la vitesse est plus élevée. Le contraire (manche d'autant plus

en avant que la vitesse est faible) traduirait une instabilité. L'avion deviendrait rapidement impilotable. Le manche à la même position dans tout le domaine de vitesse traduit un équilibre libre indifférent. Dans ce dernier cas, le centre de gravité se situe au point neutre de l'avion (ou foyer-avion).

Si la condition « pente stable » est respectée l'avion manche libre ou manche bloqué conserve son incidence de vol.

2. Stabilité statique directionnelle et latérale (exigences simplifiées). CS-VLA.177 et CS-23.177

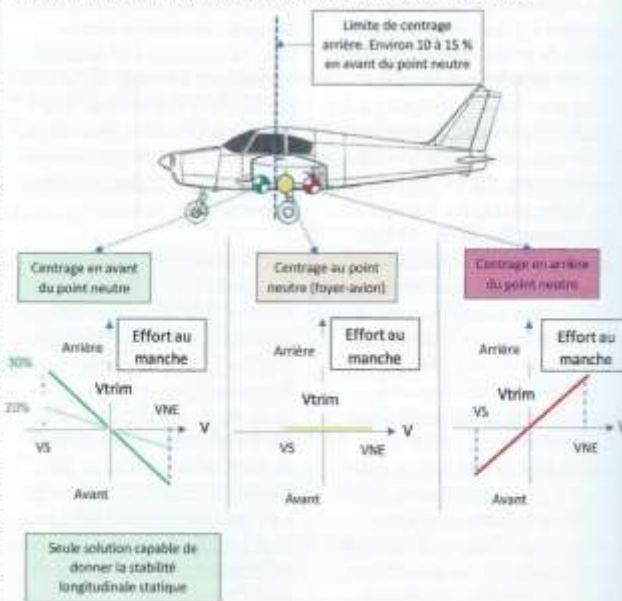
2.1. Il est exigé qu'un appareil accidentellement mis en dérapage ait tendance à en sortir naturellement (commandes libres) dans tout son domaine de vol et dans toutes les différentes configurations.

2.2. Il est exigé qu'un appareil mis accidentellement en glissade ait tendance à naturellement (com-

Figure 6. Efforts au manche en fonction de la vitesse V pour différents centrages.

Seul le centrage avant (en général moins de 35 % de la corde de l'aile) permet de satisfaire la condition « pente stable de l'effort au manche en fonction de la vitesse ». Les droites descendantes de couleur verte, tracées pour des centrages de 30 % et 20 %, traduisent cette exigence de stabilité. Plus on va vite, plus le manche doit être en position avant pour stabiliser la vitesse. L'effort augmente (en valeur absolue) de part et d'autre de la vitesse compensée (V_{trim}).

Centré au point neutre ou plus en arrière, l'appareil serait instable et nécessiterait des corrections permanentes (courbe jaune et courbe rouge).



mandes libres) relever l'aile basse dans tout son domaine de vol et dans toutes les configurations.

2.3. Si l'on maintient une aile basse en glissade par une action aux ailerons, une action sur la commande de direction doit permettre de maintenir un cap constant sans que l'effort à la pédale ne dépasse les limites (voir § 1.1.). Les efforts sur la gouverne de direction ne doivent pas s'inverser.

3. Stabilité longitudinale dynamique. CS-VLA.181 et CS-23.181

Un appareil centré dans la plage de centrage admise par le constructeur doit pouvoir amortir des oscillations en tangage, ou de vitesse, de courte période soit commandes libres, soit commandes en position fixe.

Figures 7 et 8.

Figure 7. Réponse en vitesse à une perturbation extérieure de deux appareils stables longitudinalement et initialement compensés à V_{trim} .

1. Cas 1 : appareil très stable, l'appareil retrouve rapidement V_{trim} , au bout d'un temps Δt .
2. Cas 2 : appareil stable. Après 2 oscillations de vitesse, l'appareil retrouve V_{trim} au bout d'un temps Δt .

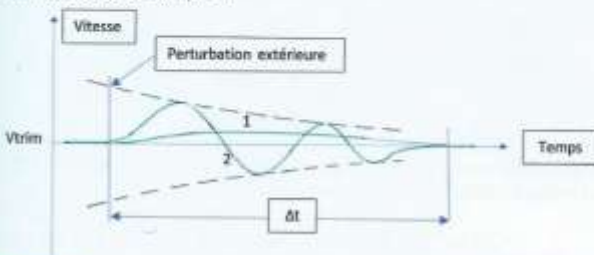
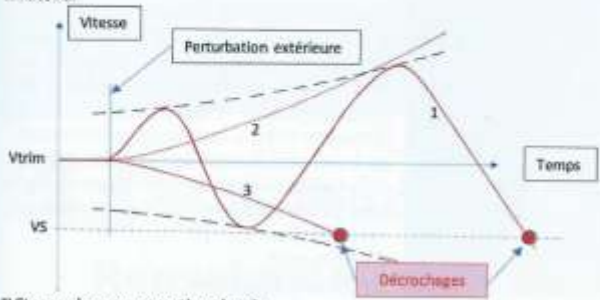


Figure 8. Réponse en vitesse à une perturbation extérieure de deux appareils instables. L'appareil est initialement compensé à V_{trim} .

1. Cas 1 : appareil instable, à la deuxième oscillation la vitesse, après avoir augmenté, a diminué jusqu'à VS. L'appareil décroche. Au cours de la première oscillation, elle était passée très près de VS.
2. Cas 2 : appareil fortement instable, dès la perturbation la vitesse augmente dangereusement, appareil en piqué.
3. Cas 3 : même appareil fortement instable, dès la perturbation la vitesse diminue dangereusement vers VS. L'appareil décroche.

N.B. le départ soit à cabrer, soit à piquer d'un appareil fortement instable est aléatoire.



*Vitesse de compensation du trim.

N.B. Sur un appareil certifié, l'instabilité ne peut provenir que d'un centrage excessivement arrière !

4. Décrochages avec ailes horizontales. CS-VLA.201 et CS-23.201

Le constructeur doit montrer l'aptitude de son appareil à pouvoir récupérer un décrochage dans toutes les configurations. Il doit ensuite notifier dans le manuel de vol deux vitesses de décrochage à pleine charge :

- VS0, la vitesse de décrochage en configuration atterrissage, gaz réduits ;
- VSI, la vitesse de décrochage en lisse.

Chaque base de certification exige de démontrer que l'appareil ne décroche pas en configuration atterrissage à une vitesse au moins égale à :

- VS0 = 45 kt en CS-VLA (CS-

VLA.45) ; VS0 = 61 kt en CS-23 (CS-23.49)

La récupération du décrochage, jusqu'aux premiers signes (buffeting, klaxon), ne doit pas poser de difficultés. A ce moment on doit encore pouvoir récupérer normalement des écarts de 15° en lacet ou en roulis.

5. Décrochages en virage. CS-VLA.203 et CS-23.303

On peut résumer l'exigence : dans la configuration la plus pénalisante, au cours d'un virage coordonné à 30° d'inclinaison, on doit pouvoir après un décrochage récupérer une incidence de vol normale sans que la manœuvre ait dépassé une inclinaison de 60°.

6. Vrilles. CS-VLA.221 et CS-23.221

Selon que l'avion soit, une fois certifié, autorisé ou non d'exécuter des vrilles, le constructeur et les équipages de certification doivent démontrer les aptitudes de sortie de vrilles résumées comme suit :

Avions non autorisés : après un tour de vrille ou une vrille de 3 secondes (la plus longue des deux), il doit être possible de sortir en moins d'un nouveau tour de vrille. Dans ce cas on est juste certain que l'avion une fois certifié n'entrera pas en vrille et n'effectuera pas le premier tour d'une manière incontrôlable. Mais pas question d'attendre la fin du deuxième tour, car rien ne prouve que l'avion sortirait. Il s'agit d'une manœuvre de sécurité effectuée par des équipages entraînés, équipés de parachute, et destinée à donner les premiers conseils (Manuel de vol) à un pilote qui se mettrait accidentellement en vrille.

Avions autorisés (catégorie acrobatique A ou utilitaire U). Il est d'usage de démontrer qu'au bout de 6 tours de vrilles, on peut obtenir la sortie en moins de 1,5 tour. Mais nos voltigeurs grâce à leur entraînement et à des aptitudes hors du commun démontrent des possibilités bien supérieures !

C. Conclusion.

Se méfier des différences malgré l'apparente uniformité imposée par les exigences de certification en matière de qualités de vol

1. Différences d'un avion à l'autre : des avions ayant respecté la même base de certification n'auront pas pour autant le même comportement et la marge laissée au constructeur donnera des qualités de vol parfois très différentes. D'où la nécessité de faire de la double commande sur chaque nouvel appareil. C'est à la fois une exigence réglementaire et une mesure de prudence dont la négligence a produit bien des accidents.

2. Avions à caractère dérogoaire : des appareils munis d'un parachute peuvent être certifiés tout en n'ayant pas à démontrer certaines exigences en matière de qualités de vol (par exemple la possibilité de sortir de vrille). Bien se souvenir qu'au-dessous d'une certaine hauteur, le parachute ne vous sauvera pas et que ces appareils doivent faire l'objet d'une qualification spéciale pour leur pilote.

3. Avions certifiés en CNRA : les appareils de construction amateur ne sont pas obligés de satisfaire les exigences des appareils certifiés en CDN. Ils peuvent de ce fait être conçus dans un esprit ignorant totalement les règles de certification sans pour autant être plus dangereux que les autres. Mais tant que les qualités de vol, usuellement reconnues comme garantes d'un certain niveau de sécurité ne sont pas atteintes, il faut les piloter avec toutes les précautions liées à l'exploitation d'un appareil expérimental ou prototype.

Références utiles :

- CS-VLA, texte officiel : [lien #1 sur notre site.](#)
- CS-23, texte officiel : [lien #2 sur notre site.](#)
- CS-LSA, texte officiel : [lien #3 sur notre site.](#)
- Les vrilles des avions légers- (Claude Lelaie) - publié par France-Volige : [lien #4 sur notre site.](#)