PAR MICHEL BARRY
Pilote professionnel, ingénieur aéronautique

Le compensateur de profondeur est bloqué... DANGER !

1953 à Melun – Villaroche : «...dans la tribune René Pleven, ministre de la Défense français et Dunkan Sandys, le ministre britannique de l'Armement. Présent aussi le responsable des achats de RAF. Décidé à les éblouir, le pilote français Constantin Rozanoff veut effectuer un passage à très basse altitude à la vitesse du son. Il décolle, s'éloigne en montant et revient vers le terrain en piqué. Il allume la postcombustion au moment où il se retrouve parallèle au sol et règle l'assiette de l'avion avec la commande électrique du trim. Quand il veut contrecarrer une tendance à piquer, la commande se bloque. Le Mystère IV descend, touche le sol et explose devant le publique. C'était la fin d'un pilote que l'on croyait invulnérable ».

1999 en Alabama : le prototype du monoplace américain de construction amateur Glastar percute le sol à la verticale et tue ses deux pilotes. On retrouve le compensateur en butée à piquer. L'enquête découvrira que ce compensateur surdimensionné était trois fois plus efficace que nécessaire à assurer l'équilibre de toutes les configurations normales de l'appareil. Un bulletin de service sera émis à l'adresse des constructeurs. *www.champsclock.com/glastarcrash.htm*

2007 REC INFO n°4 § 5 : Un incident rapporté avec beaucoup de précision nous rappelle que le compensateur de profondeur peut toujours et encore être responsable de réelles situations d'urgence *(voir encadré ci-contre).* →

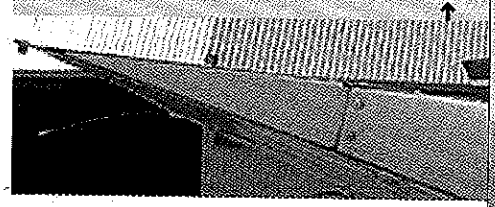
Panne du compensateur de profondeur REC info n° 4/2007 §5

L'auteur de ce récit totalise 550 heures de vols dont douze dans les trois mois précédant l'événement et soixante-dix sur le type d'avion utilisé, essentiellement en navigation.

« Ce jour-là, j'utilise un avion muni d'un compensateur électrique. Je décide de m'entraîner à atterrir dans différentes configurations. Une passagère, non pilote, m'accompagne en place droite. Je m'intègre dans le circuit d'un aérodrome doté d'une piste revêtue, longue et large. J'ai l'intention d'y réaliser des atterrissages en configuration lisse.

En vent arrière, je ressens une force importante à cabrer sur le volant. Je dois pousser sur celui-ci pour la contrer. J'actionne le bouton du compensateur à piquer, sans effet. Je poursuis mon action en vérifiant son effet sur la commande manuelle. Elle est immobile, comme l'indicateur de position, proche de la position plein cabré. Je comprends alors que je dois faire face à une anomalie. Je mets l'interrupteur du compensateur sur la position "off" et tente d'actionner la commande manuelle. Celle-ci est bloquée.

COMMENTAIRE REC : Exemple d'une gouverne de profondeur en position « plein cabré »



Je remets mes deux mains sur le volant pour conserver une assiette normale et demande à ma passagère de m'aider à le maintenir, car je crains de ne pas pouvoir contrôler l'avion tout seul. Je pense à ce moment que le moteur électrique du compensateur est peut-être toujours en fonctionnement et s'oppose à mon action manuelle. Je libère une de mes mains du volant et tire le disjoncteur du compensateur. Aucun changement sensible ne survient.

Je décide alors d'atterrir le plus rapidement possible et j'augmente ma vitesse. Je signale mon problème et mes intentions sur la fréquence. Je décide de laisser les volets rentrés pour ne pas générer un couple de tangage lors de leur sortie. Je rejoins la courte finale en ayant l'impression que l'effort continue à augmenter. J'atterris à une vitesse importante et parcours une grande partie de la piste avant de m'arrêter.

COMMENTAIRE REC : Quels sont les effets de la sortie des volets sur l'avion que vous utilisez ?

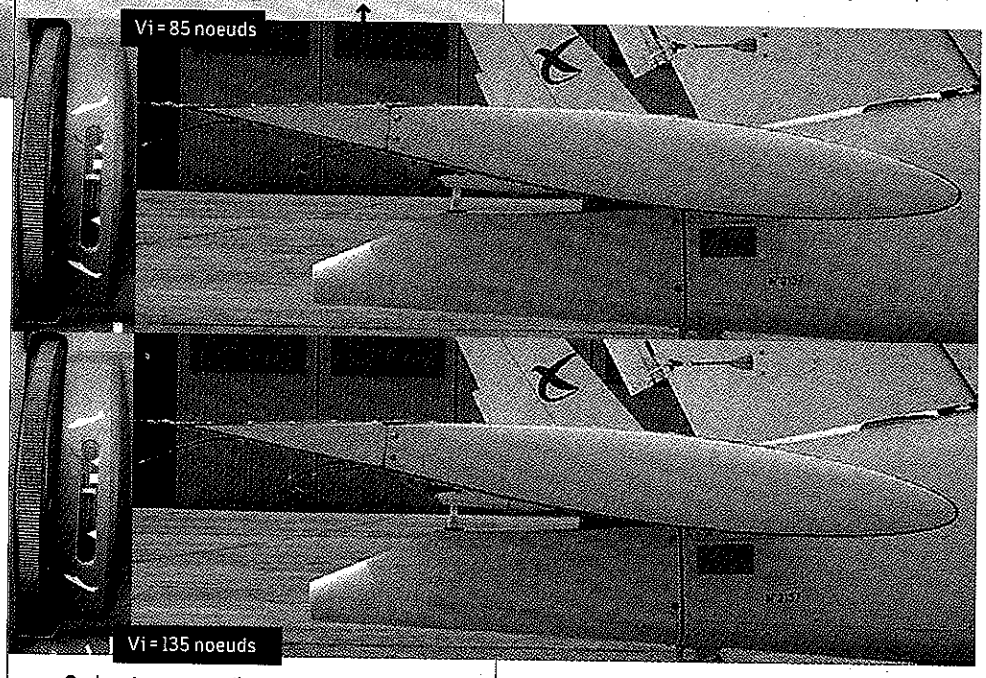
Au parking, je constate qu'un câble est sorti de la commande manuelle du compensateur. Nous laissons l'avion sur place. J'apprends quelques jours plus tard que le câble du compensateur s'est rompu. Sur la gouverne de profondeur, le compensateur s'est placé en butée à cabrer.

COMMENTAIRE REC : Comment évaluer la longueur de piste nécessaire dans de telles circonstances ?

Plus tard, j'ai éprouvé le besoin de rassembler des informations sur le compensateur :

1 • En vol stabilisé à une puissance donnée, chaque position du compensateur de profondeur correspond à une vitesse de l'avion. Rejoindre l'aérodrome au plus tôt était compréhensible, mais en augmentant ma vitesse, l'effort augmentait aussi.

COMMENTAIRE REC : Exemple de réglage du compensateur, en palier, volets rentrés. La gouverne de profondeur est photographiée au sol avec les réglages correspondants. Les valeurs observées dépendent du centrage.



2 • Le risque que j'avais imaginé de ne plus pouvoir contrôler l'avion était exagéré. Avec le compensateur en butée à cabrer, l'avion est conçu pour qu'il reste possible de contrôler l'assiette en exerçant un effort acceptable pendant une certaine durée.

COMMENTAIRE REC : Les règlements de certification exigent que la force à exercer reste en deçà d'une certaine valeur.

Je retiens de cet événement que bien connaître son avion réduit le stress en situation délicate : je connaissais parfaitement la position du disjoncteur et le fait de l'avoir tiré m'a rassuré, même si cela n'a probablement eu aucun effet. Cet événement me renseigne aussi sur notre capacité à réagir dans une situation inconnue, et sur la diminution de notre capacité mentale lorsque l'on doit fournir un effort physique important. Je comprends d'autant mieux l'intérêt de répéter les procédures d'urgence. Par définition, la prochaine fois que je rencontrerai une situation délicate, elle sera nouvelle. »

COMMENTAIRE REC : Les procédures d'urgence sont décrites dans le manuel de vol.

Lors de la conversation téléphonique, le pilote précise qu'il n'avait pas mis le pilote automatique sous tension pour ce vol. Il ne se souvient pas avoir abordé ce type de panne lors de sa formation. ●

Tout savoir sur le trim

La pire de toutes ses pannes est probablement celle où le compensateur (on dit souvent « le trim ») se bloque en butée (à cabrer ou à piquer) et introduit ainsi un effort permanent dans la chaîne de profondeur. Le pilote doit alors contrer cet effort sous peine de perdre le contrôle longitudinal de son appareil. Dernier maillon de la chaîne : les muscles, ceux qui participent à maintenir le manche au neutre. Ils risquent être soumis à rude épreuve si l'effort à fournir sans bouger ou presque est intense et prolongé. Et si aucun terrain n'est assez proche pour faire cesser le supplice au plus tôt ces muscles, même sous un effort apparemment modéré (une dizaine de décanewton), vont bien vite déclarer forfait selon un processus naturel que les pilotes méconnaissent trop souvent. Le Dr. Magy, neurologue au CHU de Limoges, nous explique et nous confirme cette réalité. *(voir encadré ci-dessous).*

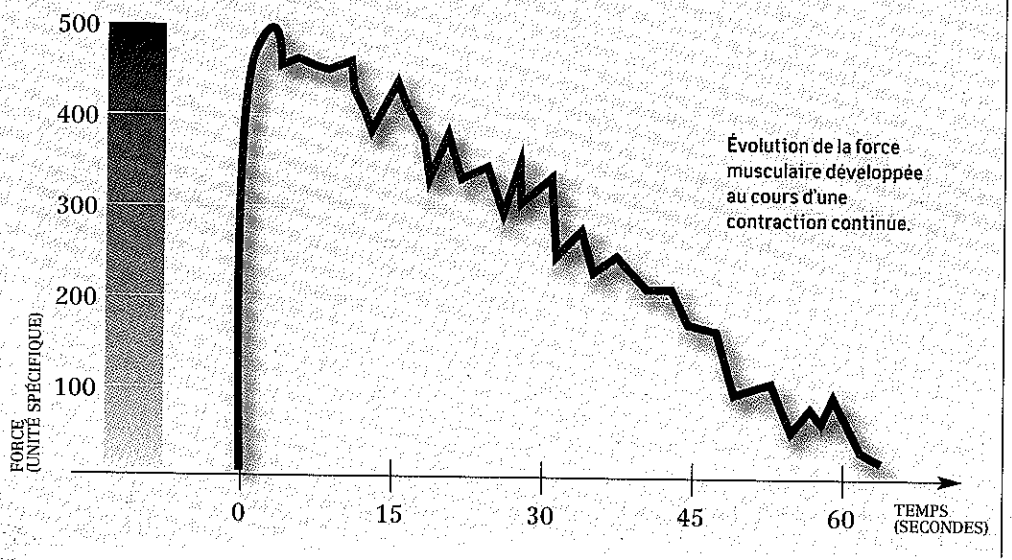
Commentaires du Dr. Laurent Magy praticien hospitalier

L'effort musculaire dont il est question ici est un exemple assez classique d'une situation à risque au cours de laquelle la fatigue musculaire peut survenir très rapidement et le plus souvent à l'insu de la personne. En effet, contrairement à une activité musculaire répétitive classique entraînant des enchaînements de contractions/décontractions des fibres musculaires mises en jeu, l'effort continu tendant à maintenir un objet dans une position fixe, même contre une résistance faible, implique la mise en tension permanente de muscles agonistes et antagonistes (par exemple le couple biceps fléchisseur / triceps extenseur).

Classiquement, dans une telle situation, les capacités à maintenir l'effort s'épuisent assez vite, selon une courbe de décroissance quasiment linéaire *(voir figure ci-dessous)* : c'est le phénomène de fatigue musculaire. Contrairement à une idée répandue, ce phénomène de fatigue musculaire peut survenir assez rapidement, même pour des efforts jugés modestes. Ainsi, on peut démontrer expérimentalement, qu'une stimulation musculaire à 80 Hz (correspondant à un effort maximal) entraîne une baisse de la force en quelques secondes alors qu'une stimulation à 20 Hz ne permet le maintien de la force que pendant une minute, bien que cette force corresponde à 70 % de celle produite à 80 Hz.

Cette fatigue survient après un travail musculaire. Elle est classiquement mise en rapport avec un épuisement des réserves énergétiques des cellules musculaires contractiles, siège classique d'une acidose. La saturation des mécanismes de transport d'oxygène et l'insuffisance circulatoire à ces niveaux aggravent le déséquilibre entre l'offre et la demande. C'est particulièrement le cas au cours des efforts musculaires brefs mais relativement intenses qui font intervenir la voie dite anaérobie. L'accumulation d'acide lactique dans la fibre musculaire ralentirait la production d'ATP indispensable au métabolisme énergétique du muscle.

Ce phénomène n'est probablement pas le seul impliqué, mais pourrait expliquer en grande partie les phénomènes de crampes et d'épuisement musculaire parfois brutal survenant dans ces conditions particulières.



Évolution de la force musculaire développée au cours d'une contraction continue.

RAPPELS TECHNIQUES SUR LE RÔLE ET SUR LE FONCTIONNEMENT DU COMPENSATEUR DE PROFONDEUR.

Pour un avion de formule classique ou canard, l'empennage (arrière ou avant), doit produire une résultante dirigée vers le bas (avion classique) ou vers le haut (avion canard) afin d'équilibrer le couple piqueur engendré par le fait que le centre de gravité de l'avion est normalement situé en avant du point d'application de la portance de l'aile (condition de stabilité longitudinale).

Pour un avion cette résultante aérodynamique, modulée par le pilote en fonction des circonstances du vol, constitue la fonction unique de l'empennage horizontal et elle est indispensable à l'équilibre et au contrôle longitudinaux.

Elle dépend essentiellement des facteurs suivants :

- ➔ La vitesse
- ➔ La position du centre de gravité
- ➔ La configuration (train, volets)
- ➔ La poussée ou traction du moteur (à un degré moindre sur un appareil bien réglé)

Elle est donc variable au cours du vol et le braquage de la gouverne de profondeur lui donne la valeur convenable soit pour les évolutions, soit pour les phases stabilisées du vol.

Pendant les manœuvres il n'est en général ni nécessaire ni conseillé de compenser l'effort à produire car il représente pour le pilote une indication sur le facteur de charge qu'il est en train d'imposer à l'avion (« effort par g »).

En revanche en vol stabilisé il est inutile et fort déconseillé d'appliquer un effort permanent qui fatiguerait le pilote et nuirait à la précision du pilotage *(voir Info-Pilote n° 589)*. Le trim a précisément été inventé pour neutraliser cet effort en provoquant dans la chaîne de commande un effort antagoniste ajustable (to trim = ajuster, régler) jusqu'à l'obtention, manche libre, d'une position de la gouverne de profondeur qui assure le régime de vol désiré ou la vitesse via une régulation de l'incidence.

Quand le compensateur fonctionne normalement il s'ajuste à la demande du pilote (ou du pilote automatique) jusqu'à ce que l'appareil tienne sensiblement une trajectoire rectiligne (montée, palier, descente).

Ensuite de brèves corrections de très faible amplitude sur la commande de profondeur,

nécessitant peu d'efforts, et surtout sans retoucher le réglage du compensateur sont suffisantes pour assurer la pente désirée.

LES TECHNOLOGIES COURANTES DU COMPENSATEUR DE PROFONDEUR ET LES SOURCES POSSIBLES DE DÉFAILLANCE

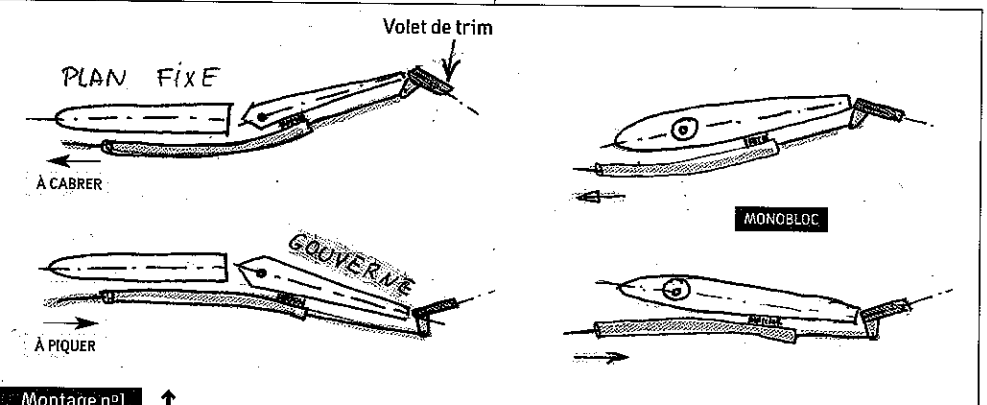
Son rôle est d'introduire une force réglable, aérodynamique ou mécanique, destinée à maintenir un braquage adéquat de la gouverne de profondeur. Plusieurs technologies sur les avions légers :

1. Montage n°1 Un petit volet est articulé au bord de fuite de l'empennage horizontal, qu'il soit monobloc (DR400, TB20) ou qu'il soit constitué de deux parties (Cessna 172)

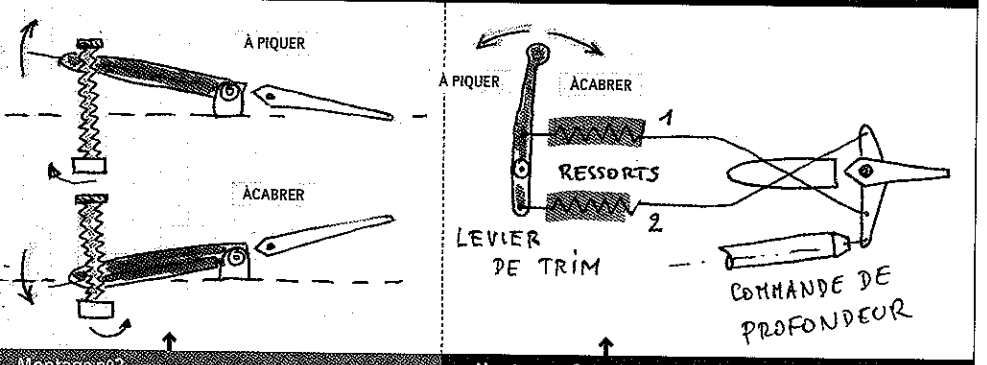
2. Montage n°2. Le calage du plan fixe (Piper Cub, Mooney) est modifié dans la cas d'un empennage en deux parties (plan fixe + gouverne de profondeur)

3. Montage n°3. Un ou des ressorts (Piper Tomahawk, Cirrus) sont bandés plus ou moins et introduisent l'effort de compensation recherché dans la commande de profondeur. Applicable à un monobloc ou à un empennage en deux parties

Dans les 3 cas la source d'énergie nécessaire à la manœuvre d'ajustement du dispositif-compensateur peut être soit musculaire (levier, volant, manivelle...) soit électrique, soit musculaire et électrique (au choix) comme c'est le cas sur les appareils équipés d'un pilote automatique.



Montage n°1
Que l'empennage soit en 2 parties ou monobloc *(exemple du REC, p.47)* le volet de trim agit selon le même principe : il maintient la gouverne braquée en sens inverse de son propre braquage. Les défaillances proviennent essentiellement de la ligne de commande (en bleu)



Montage n°2
Le plan fixe a son calage modifié par un dispositif de commande progressif (et une vis sans fin). Les défaillances proviennent soit de la source motrice soit de la mécanique qui active le dispositif de rotation du plan fixe (en bleu) autour de sa charnière

Montage n°3
Un levier ou une molette ou un volant, bandent un ressort et simultanément détendent l'autre. Si 2 est davantage tendu que 1 il s'ensuit une tendance à relever la gouverne donc à cabrer. Et inversement pour une tendance à piquer. Les défaillances sont liées au mécanisme de tension des ressorts ou aux ressorts eux-mêmes

Verspieren
Assurances

Vous pilotez, nous assurons.

Des garanties sur-mesure :

- Corps et RC aéronef
- RC instructeur
- Individuelle accident
- Financement
- Garantie Emprunteur

Contactez-nous !
N° Vert 0 800 560 568

VERSPIEREN
COURTIER EN ASSURANCES

Verspieren Aviation
57, rue de Villiers
92200 Neuilly-sur-Seine

aviation.verspieren.com

Spécial concepteurs-amateurs

- **Ne surdimensionnez pas l'efficacité du compensateur de profondeur. Après votre campagne d'essais, rognez tout le surabondant (surface du volet de trim, ressorts trop puissants, calage trop ample du plan fixe).**
- **Ne montez pas de servomoteur en boucle avec asservissement de position, type servo proportionnel de modèle réduit. Une panne du potentiomètre et le trim part en butée ! Préférez le moteur en boucle ouverte commandé simplement avec un inverseur, protégé par un breaker, et avec un répétiteur de position indépendant.**

La défaillance la plus redoutable à savoir le compensateur bloqué en butée (à cabrer ou à piquer) peut se produire sur les trois types de montages :

1 • le volet articulé au bord de fuite peut être braqué à fond et bloqué si l'un des câbles qui le manœuvrent (montage en push pull) est défaillant (rupture, déraillement, blocage...) ou en cas de montage à bielle, si le mécanisme se bloque. C'est le cas développé dans l'exemple du REC et qui relate un vol au cours duquel le trim, parti en butée à cabrer, obligeait le pilote à pousser en permanence le volant avec un effort très gênant à la longue au point qu'il a eu recours à la passagère pour... jouer le rôle du trim en exerçant un effort permanent.
• le volet peut être braqué à fond par un servo-moteur électrique qui tombe en panne et reste bloqué plein cabré ou plein piqué (« déroulement de trim ») → *1999 en Alabama*, accident du Glastar.

2 Le calage du plan fixe en général assuré par un mécanisme de vis sans fin, mû soit par un dispositif mécanique manuel soit par un servo-moteur, peut se bloquer en position extrême lors d'une manœuvre d'ajustage ou être aussi victime d'un déroulement de trim *(1953 à Melun-Villaroche → accident de Rozanoff)*. Même conséquence qu'avec un volet (cas n°1).

3 La rupture d'un ressort ou le blocage du dispositif de compression des ressorts peuvent générer un effort parasite anormal que le pilote va de nouveau, comme dans les cas précédents devoir contrer pendant tout le reste du vol.

Un autre type de situation désagréable peut être rencontré sur un montage n°1 *(voir p.49)* si le volet de trim est totalement libéré de ses liens (rupture de câble, désolidarisation de la bielle de commande). Il peut alors se mettre à osciller (phénomène de flutter), excité par les tourbillons du bord de fuite de la gouverne, et se rompre ce qui est un moindre mal si le volet est totalement arraché. Malheureusement un arrachement partiel peut constituer une surface capable d'exercer un effort bien gênant et même pire au bord de fuite de la gouverne de profondeur.

PRÉVENIR LA PANNE PUIS ÊTRE CAPABLE D'Y FAIRE FACE LE CAS ÉCHÉANT

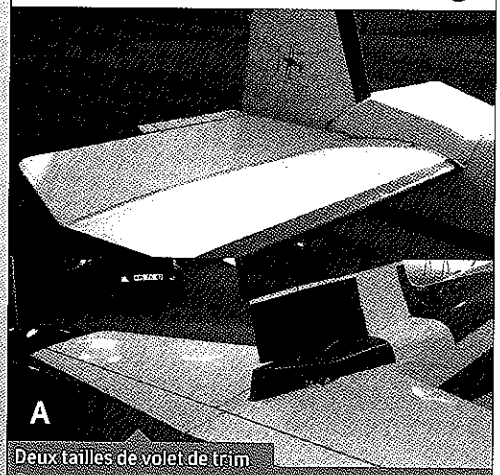
Le bon suivi des procédures de maintenance, une visite prévol conduite par un œil expert, auraient évité la plupart des incidents ou des accidents imputables au compensateur.

Un compensateur défectueux ou un signalement de dysfonctionnement doivent impérativement faire annuler le vol jusqu'à ce que la panne soit identifiée et réparée. Pensez accessoirement que le compensateur est aussi un secours de la commande principale.

Cependant la panne est toujours à envisager et une bonne connaissance de l'appareil peut réduire notablement la gravité des conséquences sur la suite du vol que dans la plupart des cas il faut interrompre au plus tôt.

Il faut bien connaître l'autorité du trim. Par exemple le blocage du petit volet du D 112, appareil qui nécessite très peu de compensation dans tout son domaine de vol (centrage quasi-constant, pas de volets, faible écart de vitesse), introduira un effort à peine perceptible et le vol pourra se poursuivre sans trop de problèmes.

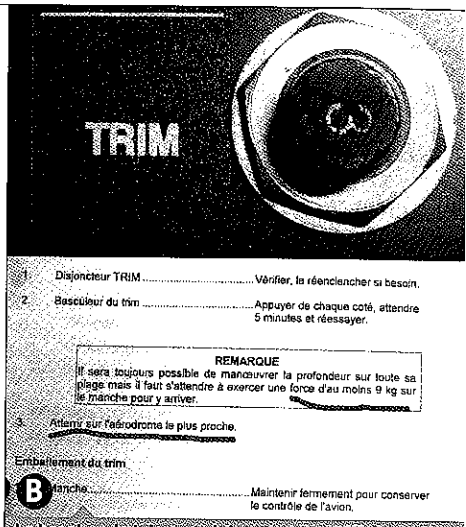
Au contraire des appareils munis de volets hypersustentateurs importants car susceptibles d'être centrés sur une large plage (Cessna 172, Piper PA 28, TB 20) et dotés de volets de compensateur de grande dimension donneront bien des soucis au pilote si le trim est bloqué en butée. A



Deux tailles de volet de trim
On comprend aisément qu'en butée, à cabrer ou à piquer, le petit volet de trim du DR 1050 introduise moins d'effort à contrer que l'énorme volet du ST 10 qui occupe toute l'envergure et une surface importante de la gouverne de profondeur monobloc

Bien que le constructeur de l'appareil ait dû pour obtenir le CDN recevoir l'approbation des autorités (la DGAC en France après essais et avis du CEV) il ne garantit pas l'intensité de l'effort parasite puisqu' aucune exigence ne le limite explicitement ni ne l'oblige à envisager cette panne pour la rédaction des procédures d'urgence. Certains constructeurs mentionnent cependant la panne de compensateur dans les procédures d'urgence. B

Mais rassurez-vous, Jean Claude Bordenave, pilote d'essais, m'a confirmé d'une part que tous les appareils qu'il avait certifiés, comme d'ailleurs la plupart des appareils légers, étaient pilotables « hors trim », et d'autre part que les seules consignes intelligentes en cas de trim en butée sont :



Le breaker de trim est clairement identifié sur le panneau de breakers. Une information apparaît dans la chek list d'urgence

1 • Ne lâcher le manche à aucun prix, la brusque manœuvre, à cabrer ou à piquer pouvant provoquer un dépassement du facteur de charge extrême
2 • Atterrir au plus tôt.

• Dans le cas particulier des appareils munis d'un trim électrique on mettra le circuit hors tension en tirant le breaker (figure B) dès le moindre doute afin de prévenir un éventuel déroulement de trim.

• Et surtout on ne cherchera pas à « réparer » en vol si on a réussi à stopper le mouvement intempestif avant le départ en butée. Le mieux pourrait devenir l'ennemi du bien et la remise sous tension pourrait terminer la course vers la butée.

• La connaissance de la mécanique du vol peut faire gagner de « précieux newtons de répit » en cas de panne du compensateur. En cas d'appareil devenu piqueur, l'augmentation de la vitesse diminuera l'effort à tirer. Pour un appareil cabreur la diminution de vitesse va faire diminuer l'effort à pousser.

Le rédacteur du REC rapporte très bien que s'il avait réfléchi à ce comportement il n'aurait pas laissé augmenter sa vitesse, ce que l'incitait à faire l'inconfort de la situation afin d'atterrir au plus tôt.

• Enfin si l'avion est encore pilotable malgré l'effort appliqué, on évitera de modifier le braquage des volets de courbure (ce qu'a fait intuitivement le rapporteur du REC) en particulier s'ils sont importants et si l'appareil est piqueur. Leur sortie pourrait en effet, par aggravation du couple piqueur, dégrader davantage le déséquilibre d'effort au manche.