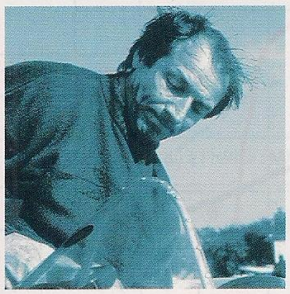

par **MICHEL BARRY**
Pilote professionnel,
ingénieur aéronautique

# Plein gaz à basse vitesse !
## Bien connaître les limites du contrôle des effets moteur aux ailerons

**Des exemples récents d'accidents ou de pertes de contrôle montrent que les effets moteur ont pu dépasser l'autorité des ailerons en matière de contrôle du roulis.**

Des moteurs de plus en plus puissants, installés sur des appareils légers à la voilure hypersustentée, font ce mois-ci l'objet d'une réflexion concernant leurs qualités de vol à basse vitesse. En effet, le couple de renversement dû à l'hélice, couple parfois multiplié par un réducteur, produit des effets indésirables sur les axes de lacet et de roulis.
Les contrer mobilise une partie du potentiel aérodynamique des gouvernes, notamment des ailerons et de la gouverne de symétrie (ex-dérive pour les anciens). Et ce d'autant plus que les basses vitesses permises par les volets ne favorisent pas l'alimentation des gouvernes.

Dans les lignes qui suivent nous évaluons approximativement quel braquage des ailerons, à très basse vitesse, est nécessaire à la compensation du couple maximal produit par l'hélice.

Nous resterons sur l'équilibre autour de l'axe de roulis et ne parlerons pas de l'influence du souffle hélicoïdal autour de l'axe de lacet.

Notre mise en garde consistera à attirer l'attention des pilotes sur le dosage des ailerons de leur avion, notamment de ceux à fort couple de renversement. Nous leur recommanderons surtout de bien connaître au-dessous de quelle vitesse V les ailerons risquent de perdre toute leur autorité, même braqués à fond. En fonction des caractéristiques (géométrie de la cellule, couple maxi délivré par le moteur, couple transmis à l'hélice), nous proposons d'évaluer un paramètre indicatif : ΔCz (Figure 1 et Figure 2).

Les résultats pourront utilement être complétés en vol avec instructeur, lors de leçons concernant les basses vitesses, et dans le respect des précautions d'usage (hauteur de sécurité, environnement, présence d'autres appareils...).

### A. Mécanique de l'équilibre autour de l'axe de roulis

#### 1. Le principe de l'équilibre

Une hélice tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, vue de la place pilote, engendre un couple de renversement qui tend à faire pivoter l'appareil autour de son axe de roulis et dans le sens des aiguilles d'une montre : tendance à s'incliner à droite (Figure 1).

Il n'existe pas d'autre moyen pour combattre cette tendance que d'agir sur la différence des portances gauche et droite, donc essentiellement sur le braquage des ailerons. Le constructeur peut aussi caler les deux demi-ailes à des angles très légèrement différents, au risque d'avoir une cellule définitivement dissymétrique, ce qui est toujours désagréable quand le moteur est au ralenti.

Ainsi la plupart d'entre eux laissent le rôle de compensation aux ailerons seuls. Donc soit à l'action permanente du pilote, soit éventuellement à un compensateur de roulis réglable (trim de gauchissement). On trouve aussi parfois un flettner posé sur un aileron. Son rôle est de réaliser un compromis acceptable entre la croisière et les basses vitesses en compensant à la fois les effets moteur et un défaut toujours possible de symétrie de l'ensemble de la voilure.

#### 2. Le fonctionnement des ailerons : les coefficients de traînée Cx et de portance Cz de la partie de l'aile portant les ailerons

Quand l'un se lève (braquage négatif), l'autre se baisse (braquage positif). Pour des raisons liées au phénomène de lacet inverse (l'aileron qui se baisse introduit une traînée supplémentaire du tronçon d'aile qu'il occupe par augmentation de Cx, alors que l'aileron qui se lève diminue la traînée par diminution de Cx) les braquages des deux ailerons peuvent être non symétriques. Ainsi, souvent, les constructeurs réduisent le braquage de l'aileron qui se baisse afin que sa traînée n'introduise pas un couple de lacet trop violent

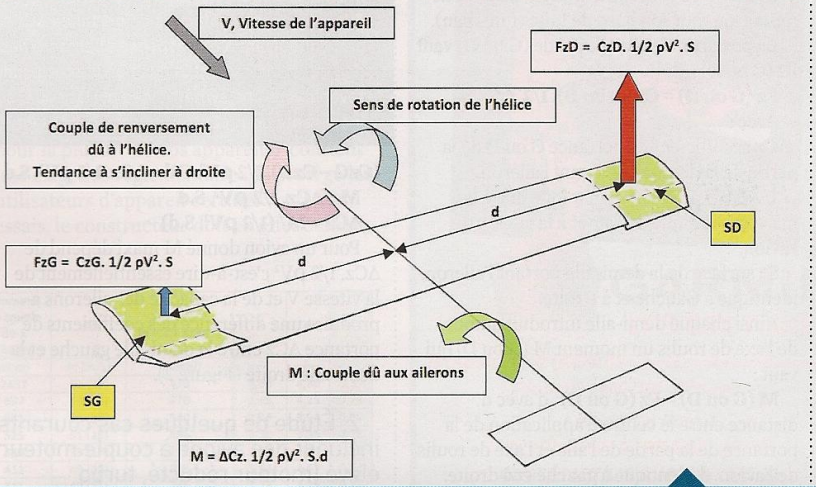


**Figure 1.** Les paramètres de calcul du moment du couple dû au braquage des ailerons. Ici manche à gauche, on génère un couple de roulis à gauche de moment M. Avec :
• Cz des extrémités d'aile équipées d'aileron : CzG et CzD • Surface S porteuse de l'aileron. En général S = SG = SD • d, Distance entre le point d'application de la portance, sur SG ou SD, et l'axe de roulis • V, Vitesse relative de l'avion (Vp) • ρ, masse volumique de l'air

(braquage différentiel des ailerons G et D).

L'autre raison de la limitation du braquage positif est liée au risque de décrochage de la partie de l'aile portant l'aileron. En effet le braquage de l'aileron équivaut à une augmentation d'incidence, il accroît donc le risque de décrochage et la perte d'efficacité de toute la surface aux fortes incidences.

Ainsi on peut retenir (Figure 2) :

• aux incidences de vol usuelles (0° à 10 ou 12°), un braquage donné des ailerons provoque une différence du coefficient de portance ΔCz (ΔCz = Cz Droit – Cz Gauche) sensiblement constant ;

• au-dessus de 10 ou 12° environ, le même braquage des ailerons provoque ΔCz qui s'amenuise au fur et à mesure que l'incidence de l'aile se rapproche de l'incidence de décrochage (15 à 20° selon les profils). ΔCz peut même changer de signe une fois l'aile décrochée. Par exemple, avec le manche braqué à fond à gauche, l'appareil s'inclinerait à droite. On comprend tout l'intérêt de ramener le manche au neutre, voire du côté où l'appareil s'incline quand les deux demi-ailes sont décrochées et surtout quand une seule est décrochée (cas de la vrille).

## B. Mise en forme de l'équilibre latéral et application à quelques cas d'appareils avec et sans réducteur. Cas d'une hélice tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre

### 1. Le moment de roulis dû aux ailerons (Figure 1)

Seules les parties des demi-ailes portant l'aileron participent au contrôle du roulis.

L'aileron peut occuper une partie de la demi-aile ou tout son bord de fuite (full-span).

La portance de chaque partie (G ou D) vaut Fz (G ou D) :

**Fz (G ou D) = Cz (G ou D). 1/2 ρV². S**

Avec :

**Cz :** coefficient de portance G ou D de la partie de la demi-aile portant l'aileron.

**1/2 ρV² :** pression dynamique due à la masse volumique de l'air et à la vitesse de l'avion.

**S :** surface de la demi-aile portant l'aileron, identique à Gauche et à Droite.

Ainsi chaque demi-aile introduit autour de l'axe de roulis un moment M (G ou D) qui vaut :

**M (G ou D) = Fz (G ou D)** . d avec d, distance entre le centre d'application de la portance de la partie de l'aile et l'axe de roulis de l'avion. d identique à gauche et à droite.

Le moment résultant M = MG - MD peut s'écrire :

**M = CzG. 1/2 ρV². S.d - CzD. 1/2 ρV². S.d = (CzG – CzD). 1/2 ρV². S.d = ΔCz. 1/2 ρV². S.d**

**M = ΔCz. 1/2 ρV². S.d**

**ΔCz = M/ (1/2 ρV². S.d)**

Pour un avion donné M maxi dépend de ΔCz. 1/2 ρV² c'est-à-dire essentiellement de la vitesse V et de la capacité des ailerons à produire une différence des coefficients de portance ΔCz entre la demi-aile gauche et la demi-aile droite (Figure 2).

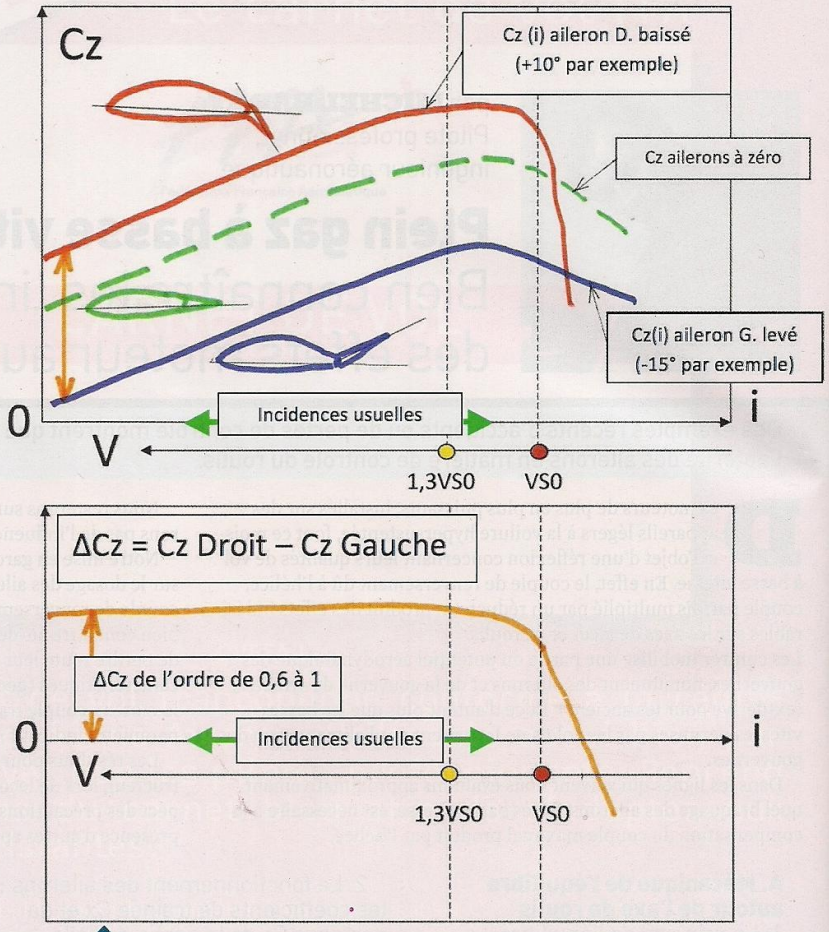


**Figure 2.** Coefficients de portance, dans le cas d'un braquage du manche à gauche, pour différentes incidences i de l'aile.

**2.a** - L'aileron gauche est levé, l'aileron droit est baissé. Aux incidences i de vol usuelles l'écart de coefficient de portance ΔCz reste sensiblement constant. Mais entre 1,3 VS0 et VS0, ΔCz diminue car le braquage positif de l'aileron droit fait décrocher l'extrémité de l'aile droite. Au contraire le braquage négatif de l'aileron gauche retarde le décrochage.

**2.b** - L'écart de coefficient de portance ΔCz se réduit très vite autour de VS0 et peut même s'inverser, conduisant à une réponse aberrante des ailerons. Remettre les ailerons à zéro, manche au neutre en latéral, est la position la plus prudente, quand toute l'aile est décrochée. Elle permet de revenir vers une symétrie des portances G et D. Cette symétrie serait cependant (et par définition) inopérante pour contrer un mouvement en roulis dû au couple de renversement de l'hélice.

### 2. Étude de quelques cas courants incluant des avions à couple moteur élevé (moteur réducté, turbo propulseur), tous certifiés, CDN ou CNSK.

Pour chaque avion, à partir des données constructeur (couple, géométrie), on évaluera ΔCz (ΔCz = M/ (1/2 ρV². S.d)), nécessaire à contrer le couple de renversement de l'hélice, supposé maximum. Cas d'une application du couple maximum qui accompagne la plupart du temps la pleine puissance. Le cas de figure est d'autant plus critique que l'on approche VS0, la vitesse de décrochage dans la configuration de train sorti et de pleins-volets. La sortie des volets permet d'envisager le vol à VS0, la plus basse des vitesses, donc le cas de figure le plus critique, celui où ΔCz requis est maximum pour contrer le couple dû à l'hélice (Figure 3).

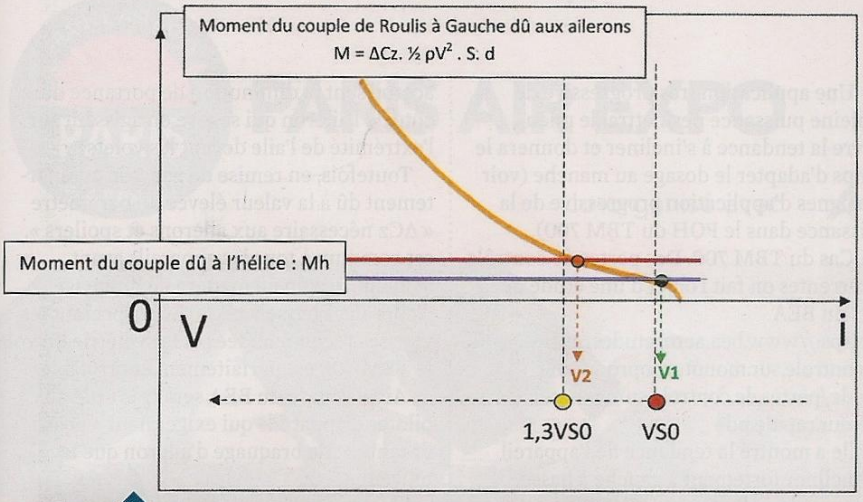


**Figure 3.** Pour des ailerons donnés, variation de la vitesse limite basse de contrôle en roulis, V1 ou V2, en fonction du moment du couple dû à l'hélice Mh.

• En violet, moment Mh dû à l'hélice, constant. Il est encore « équilibrable » par les ailerons à la vitesse V1, légèrement inférieure à VS0. C'est la configuration des avions certifiés, qui doivent être contrôlables au voisinage de VS0.

• En rouge, moment Mh dû à l'hélice, constant et supérieur à celui en violet. Il pourrait être équilibré seulement à V2, supérieure à VS0. Au-dessous de V2 l'efficacité des ailerons serait insuffisante pour équilibrer le moment de renversement dû à l'hélice. Cette insuffisance empêcherait la certification de l'appareil.

## 3. Analyse des résultats : deux tendances distinctes pour les appareils certifiés. Méfiance de rigueur pour les appareils non-certifiés et pour les prototypes

• Les appareils courants (appareils école et de voyage) nécessitent à l'approche de VS0, pleine puissance appliquée, un braquage des ailerons donnant une valeur de ΔCz de l'ordre de 0,20. Pour des ailerons standards, dont l'efficacité maximale correspond à ΔCz compris entre 0,6 et 1 (Figure 2.b), cela correspond à un braquage des ailerons de l'ordre de 20 à 30 % de leur plein débattement.

• Pour des appareils plus performants (Dyn'Aéro MCR 4S, TBM 700, Cirrus SR 22), on remarque ΔCz plus élevé, donc la nécessité d'avoir un braquage des ailerons plus important. Il s'agit d'un choix délibéré des constructeurs qui, en recherchant essentiellement un grand écart de vitesse (vitesse de croisière, vitesse d'approche à 1,3 VS0), ont de ce fait quelque peu sacrifié la dimension des ailerons au profit des volets hypersustentateurs. D'autre part, en général, la performance requiert aussi un GMP puissant, donc une hélice provoquant un couple de renversement relativement important, rapporté à la dimension de l'appareil. Bien entendu, les clients sont informés des particularités de tels appareils et la plupart du temps le constructeur propose une formation spécifique.

• Si vous analysez votre appareil, vous saurez comment le classer grâce au paramètre ΔCz. Il ne s'agira que d'une tendance, d'autres facteurs comme le dessin des ailerons pouvant en effet introduire dans leur réponse des niveaux de réaction très différents. Des ailerons à fente seront en général plus efficaces et surtout autoriseront des braquages plus importants avant le décrochage du bout de l'aile.

• La certification (base CS-23 ou CS-VLA pour la plupart de nos appareils) contient une exigence réglementaire qui protège les utilisateurs d'appareil certifiés. Lors des essais, le constructeur doit en effet démon-

| | | Puissance | Rapport de réduction | Moment du couple dû à l'hélice | VS0 | 1/2 ρVS0² (ρ = 1,2 kg/m³) | S | d | ΔCz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ch (kW) | | (N.m) | kt (m/s) | (Pascal) | m² | m | |
| TBM 700 | CDN | 700 (514) | NS. | 2457 | 53 (27) | 470 | 2,80 | 4,80 | 0,39 |
| Cirrus SR 22 | CDN | 310 (228) | 1 | 807 | 59 (30) | 470 | 1,45 | 4,25 | 0,28 |
| TB 20 | CDN | 250 (184) | 1 | 681 | 59 (30) | 540 | 1,44 | 3,94 | 0,22 |
| DR 400-180 | CDN | 180 (132) | 1 | 525 | 51 (26) | 406 | 2,10 | 3,35 | 0,18 |
| Cessna 172 | CDN | 160 (118) | 1 | 466 | 33 (17) | 173 | 3,73 | 3,60 | 0,20 |
| Diamond DA 40 D | CDN | 135 (99) | 1 :1,69 | 411 | 49 (25) | 375 | 1,64 | 4,67 | 0,14 |
| Tecnam P2002 | CDN | 100 (73) | 1 :2,43 | 311 | 40 (21) | 265 | 1,73 | 3,22 | 0,21 |
| Aquila A 210 | CDN | 100 (73) | 1 :2,43 | 311 | 43 (22) | 290 | 1,55 | 3,47 | 0,21 |
| Dyn'Aéro MCR 4S | CNSK | 100 (73) | 1 :2,43 | 311 | 44 (23) | 317 | 0,83 | 3,57 | 0,36 |
| Aero AT 3 | CDN | 100 (73) | 1 :2,43 | 311 | 44 (23) | 317 | 1,26 | 3,00 | 0,28 |
| Lionceau APM20 | CDN | 80 (59) | 1 :2,43 | 250 | 44 (23) | 317 | 1,01 | 3,40 | 0,23 |

trer que « juste avant de décrocher » le pilote peut par une action au manche dans le sens normal (par exemple contrer avec le manche à gauche un départ en roulis à droite) garder l'autorité en roulis. Et ce, jusqu'à une certaine inclinaison (15° en CS-VLA 201 (e) ou CS-23 201 (d) par exemple) et avec la pleine puissance appliquée. Cette propriété est utilisée pour permettre à un pilote de s'éloigner d'une approche involontaire du décrochage sans perdre d'altitude puis dans la foulée de ré-accélérer vers des incidences plus hospitalières. Elle est enseignée lors de l'apprentissage du pilote et elle nécessite un certain doigté afin que, bille au milieu, il parvienne à trouver le bon dosage pour maintenir l'inclinaison nulle.

• Cependant elle ne doit pas être appliquée, surtout à basse hauteur, sans être certain que l'appareil est contrôlable à très basse vitesse. Pour les prototypes, par exemple, rien ne prouve a priori que l'efficacité des ailerons sera suffisante pour contrer le couple du moteur à pleine puissance. Il s'agit de l'une des qualités de vol qui est vérifiée au cours des essais du constructeur mais qui nécessite d'être testée dans le respect des consignes de sécurité.

• Une application très progressive de la pleine puissance permettra de mieux suivre la tendance à s'incliner et donnera le temps d'adapter le dosage au manche (voir consignes d'application progressive de la puissance dans le POH du TBM 700).

• Cas du TBM 700. Des pertes de contrôle récurrentes on fait l'objet d'une étude de la part du BEA.

https://www.bea.aero/etudes/pertes.de.controle.sur.monoturbopropulseur.rapide/pertes.de.controle.sur.monoturbopropulseur.rapide.pdf

Elle a montré la tendance de l'appareil à s'incliner fortement à gauche à basse vitesse et lors d'une remise de gaz brutale. Souvent les conditions IMC ont aggravé la perte de contrôle, le pilote détectant plus tardivement le mouvement de roulis comparativement à un vol en conditions VMC. Une mauvaise gestion de l'équilibre G/D des réservoirs a parfois compliqué le maintien de l'inclinaison nulle.

Cet appareil d'exception n'est pas représentatif des avions de nos aéroclubs. En effet l'énorme couple de 2457 N.m (comparé au 681 N.m du TB 20), qui a obligé le constructeur à implanter des spoilers, nécessite un apprentissage pour le pilote. (Les spoilers accroissent la diminution de portance du côté de l'aileron qui se lève en agissant sur l'extrémité de l'aile devant les volets).

Toutefois, en remise de gaz, son comportement dû à la valeur élevée du paramètre « ΔCz nécessaire aux ailerons et spoilers », est commun à tous les appareils ayant le même besoin en matière de braquage d'ailerons à basse vitesse. En respectant les vitesses recommandées et la symétrie du vol le TBM 700 est parfaitement contrôlable.

Ainsi l'étude du BEA sera très utile aux pilotes d'appareils qui exigeraient a priori davantage de braquage d'aileron que la moyenne.

Les recommandations issues de l'étude pourront faire l'objet de questions de la part des élèves pilotes.

• L'avertisseur de décrochage est un indicateur d'incidence. À l'incidence où il retentit, quelques fractions de degrés avant l'incidence de décrochage, on entre en général dans une plage d'incidences où le constructeur ne garantit pas l'efficacité des ailerons ni même le résultat de leur braquage sur le sens du roulis. Il est donc prudent d'en être équipé et d'en tenir compte avant de procéder à des corrections hasardeuses à très basse vitesse. ●

## REX DU MOIS (n° 349) Ensemble des REX sur www.ffa-aero.fr.

### La pré-vol peut vous sauver la vie

Le pilote arrive à l'aéroclub pour faire un vol sur un DR42. Au vu du planning il estime que l'avion revient juste de vol d'instruction avec le chef-pilote.

Le pilote récupère les clés, monte dans l'avion et le démarre. Il contacte la tour pour faire son annonce radio en vue du vol. À ce moment, un instructeur présent dans un autre avion pas très loin, lui aussi moteur en route et presque prêt à rouler, regarde instinctivement le DR42 qui va partir. Il constate que les flammes des prises statiques sont toujours en place le long du fuselage. L'instructeur informe la tour et le pilote de la situation. Le pilote se rend compte immédiatement de l'oubli, signale qu'il suspend le roulage. Il arrête l'avion, enlève les flammes et reprend la cinématique de la mise en route. Il effectuera son vol sans problème.

#### Analyse de l'événement

Le pilote a démarré l'avion et commencé son vol sans avoir effectué de pré-vol car il était persuadé que son avion revenait de vol, de plus avec le chef-pilote, donc que tout allait bien. Il n'a même pas vu les flammes sur le fuselage alors à quelques centimètres de l'endroit où il monte dans l'avion.

#### Rappel et recommandations de l'aéroclub

Il est rappelé qu'avant chaque vol, et même si vous voyez votre avion revenir de vol, une pré-vol est obligatoire. Ce n'est pas par ce que votre avion revient de vol ou a volé il y a très peu de temps qu'il ne s'est rien passé. Il y a peut être une fuite sur une durite, un boulon est peut-être en train de se desserrer, le pilote a posé durement l'avion et n'a rien dit, etc. Ce pilote a eu de la chance qu'il ne lui soit rien arrivé, ce ne sera peut être pas votre cas si vous partez les yeux fermés sans contrôler. Ne faites jamais confiance ni au pilote précédent ni à l'état supposé de l'avion, Vérifiez vous-même !

**Pour les pré-vol, utilisez soit les check-listes ou une méthode.**

• Vérification des systèmes électriques extérieurs (les feux et avertisseur de décrochage, pompe électrique et fuites éventuelles)

• Vérification mécanique (liquide de refroidissement, huile, purge réservoir)

• Le tour avion (contrôle des surfaces, des pneus, des boulons visibles, niveau des réservoirs et mise à l'air libre)

Lorsque, sur le parking, vous vous dirigez vers votre avion, regardez-le. En le voyant de loin vous pouvez déjà vous rendre compte de son état (pneus ou amortisseurs dégonflés, les caches Pitot et flammes en place, etc.).