



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

EFFETS MOTEUR SE MÉFIER DES COUPLES PARASITES

CE MOIS-CI, NOUS ANALYSONS CINQ ACCIDENTS POUR LESQUELS LES EFFETS DISSYMÉTRIQUES INDUITS PAR LE MOTEUR UTILISÉ À FORTE PUISSANCE ET À BASSE VITESSE ONT JOUÉ UN RÔLE IMPORTANT OU MÊME DÉTERMINANT.

On a tendance en mécanique du vol à modéliser l'action du moteur à hélice comme une traction dans l'axe qui permet principalement d'augmenter la vitesse quand on pousse la poignée des gaz vers l'avant. A grande vitesse et quand la trajectoire est sensiblement rectiligne, l'approximation est suffisante pour expliquer le comportement de l'avion. Mais à basse vitesse ou lorsque l'avion est soumis à des mouvements de rotation rapide autour d'un ou plusieurs de ses trois axes, on voit apparaître des « effets moteur », dont on se dispenserait bien car ils compliquent considérablement le pilotage dans une séquence déjà bien difficile.

Après avoir décrit les principaux d'entre eux, on examinera dans quelques cas d'accidents rapportés par le BEA comment ils ont pu jouer un rôle sur la perte de contrôle.

A. Les effets parasites dus au GMP de nos petits avions : moteur à pistons + hélice

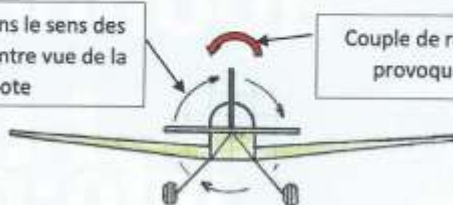
1. Les effets continus qui agissent même en vol stabilisé

1.1. Le couple de renversement nécessaire pour entraîner l'hélice et vaincre sa résistance aérodynamique. Figure 1.

Ici, l'hélice tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Le régime est continu et stabilisé. Le couple de réaction tend à provoquer un roulis à gauche. Par exemple pour un moteur de puissance $P = 200$ ch (150 kW ou 150 000 Watts) tournant à 2 600 t/min ($\omega = 272$ rd/s), le couple C vaut : $C = P/\omega = 150\ 000/272 = 551$ m.N ou 55 m.kgf.

Bien qu'apparemment élevé, ce couple parasite, qui correspondrait à un poids de 55 kg agissant sur la demi-aile gauche à 1 mètre de l'axe de roulis, est en partie compensé par l'action du souffle hélicoïdal qui agit sur l'ensemble de la voilure. Les anciens parlaient de « l'effet rototo ». Ce qui en reste est en général corrigé, après essais en vol, par une petite différence du calage des deux demi-ailes ou plus simplement par un Flettner d'aileron. Sur un appareil bien réglé, il perturbe relativement peu le pilotage sauf à basse vitesse (sur le rotor de l'hélicoptère, le couple dû au rotor principal est équilibré par l'action du rotor anti-couple situé à l'arrière du fuselage).

L'hélice tourne dans le sens des
aiguilles d'une montre vue de la
place pilote



Couple de renversement qui tend à
provoquer un roulis à gauche

Figure 1. Le couple de renversement. Peu gênant aux vitesses usuelles, il peut dangereusement s'ajouter à d'autres couples parasites à très basse vitesse.

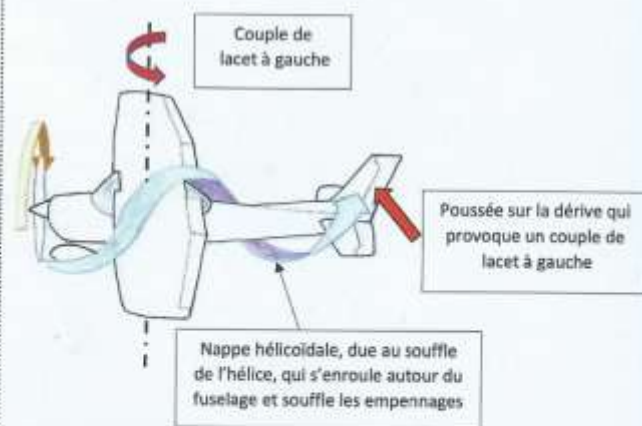


Figure 2. Le souffle hélicoïdal provoque toujours un mouvement de lacet du côté opposé à la rotation de l'hélice. Très sensible à basse vitesse, au décollage ou en remise de gaz.

1.2. Le couple de lacet dû au souffle hélicoïdal issu de l'hélice. Figure 2.

Il s'agit d'un phénomène tourbillonnaire complexe et dont le calcul ou même l'estimation dépendent entre autres de multiples paramètres, comme la géométrie de l'hélice, l'architecture générale de l'avion, les différentes vitesses... Il est très perceptible à basse vitesse et à pleine puissance.

1.3. Le couple de tangage dû au souffle hélicoïdal issu de l'hélice. Figure 3.

1.4. Le couple cabreur ou piqueur dû au non-alignement entre l'axe de traction de l'hélice et le centre de traînée. Figure 4.

Si l'axe de traction de l'hélice et le centre de traînée de l'avion ne sont pas alignés, il existe un couple permanent. Sur le schéma du CAP 10, ce serait un couple piqueur. Il pose généralement peu de problèmes sur la plupart des avions certifiés, le constructeur jouant sur le calage du moteur pour aligner la force de traction et la force de traînée.

2. Les effets transitoires qui agissent lors des variations de puissance et de couple

2.1. Le couple de renversement dû à l'inertie en rotation de l'hélice et du moteur qui accélèrent.

Figure 5.

L'inertie des différentes pièces tournantes du moteur (vilebrequin, hélice) dont on accélère la rotation provoque un couple résistant qui s'ajoute au couple de renversement dû à l'hélice.

Par exemple, pour une hélice bipale de masse $m = 20$ kg (centre de gravité de la pale à 0,5 m de l'axe, $r = 0,5$ m) passant de 1000 tours/min à 2500 t/min en 3 secondes, on trouve un couple d'inertie C de : $C = m \cdot r^2 \cdot a$, avec a , accélération angulaire de 1500 t/min en 3 sec ou 52 rd/s².

Soit $C = 20 \times 0,5^2 \times 52 = 260$ m.N ou 26 kgf par mètre.

2.2. Le couple de renversement dû à l'inertie en rotation consécutif à l'arrêt de l'application de la puissance. Figure 6.

2.3. Le couple cabreur ou piqueur dû au non-alignement entre l'axe de traction de l'hélice et le centre d'inertie (ou de gravité) de l'avion. Figure 7.

Pendant la phase d'accélération due à un accroissement de

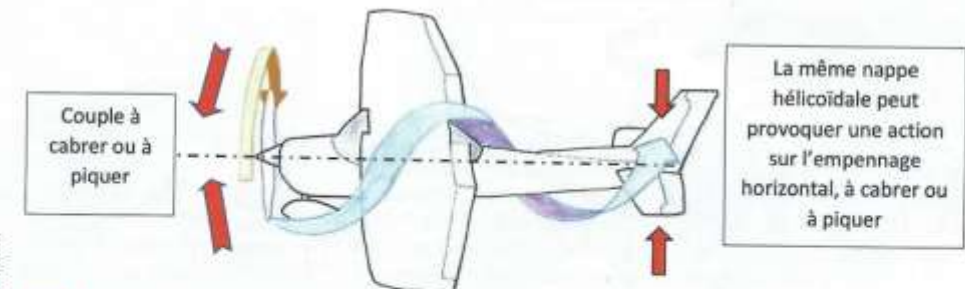


Figure 3. Le souffle hélicoïdal peut aussi provoquer une action en tangage selon qu'il attaque l'empennage par l'extrados ou par l'intrados. Par l'extrados, il rajoute un couple cabreur, catastrophique pour un avion proche du décrochage et à basse hauteur. Cependant il est d'intensité moindre que le couple de lacet.

la puissance, donc de la traction de l'hélice, l'inertie générale de la masse de l'avion produit une force dirigée vers l'arrière qui s'applique au centre de gravité. Si l'axe du moteur ne passe pas par le centre de gravité, il s'ensuit un couple cabreur ou piqueur selon que l'axe du moteur passe au-dessous ou au-dessus du centre de gravité.

3. Les effets transitoires liés aux mouvements de l'avion : les couples liés au phénomène de précession gyroscopique

Deux liens pour nos lecteurs s'intéressant aux méthodes de calcul de l'intensité des couples de précession gyroscopique se trouvent sur notre site (liens #1 et #2)

Descriptions page suivante (fig. 8) avec un avion dont l'hélice tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, vu de la place pilote. Inverser les résultats si l'hélice tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre

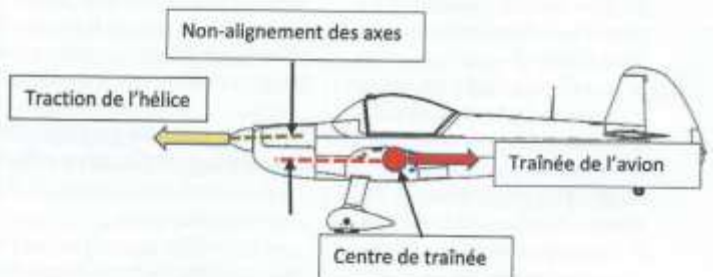


Figure 4. Le couple en tangage est généralement bien corrigé sur les appareils certifiés. Sur des prototypes ou les appareils de construction amateur sur lesquels il n'aurait pas été corrigé, il pourrait produire des écarts d'assiette (donc d'incidence) très violents et dangereux à basse vitesse, notamment en remise de gaz (couple piqueur sur la figure mais ce n'est qu'un schéma).

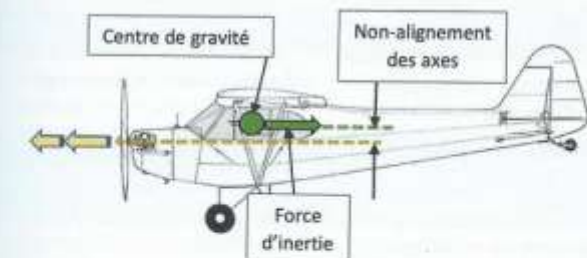


Figure 7. Le couple en tangage, lors d'une accélération ou d'une décélération (hélice utilisée en frein), qui serait dû au fait que l'axe de traction du moteur ne passe pas par le centre de gravité de l'avion, est en général ou modeste ou bien corrigé. Il dure le temps pendant lequel la vitesse augmente ou diminue. Dans le schéma de l'accélération ci-dessus, il produirait un couple à cabrer, mais ce n'est qu'un schéma!

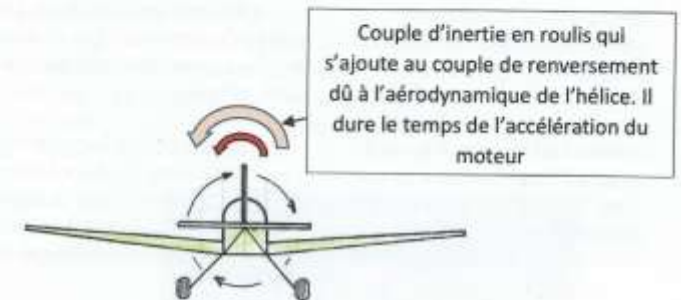


Figure 5. Pendant l'augmentation de régime, l'inertie des pièces tournantes du moteur produit un couple de renversement qui s'ajoute à celui de la figure 1 et peut aggraver une situation délicate lors d'une brutale remise de gaz.

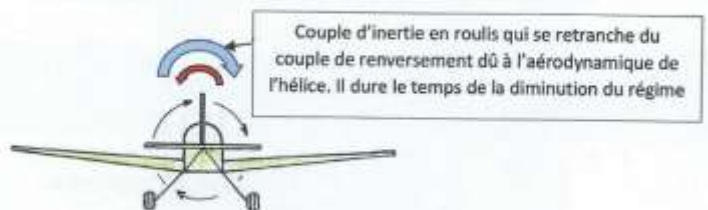


Figure 6. Lors d'une réduction brutale des gaz le couple d'inertie dû à la décélération des pièces tournantes se retranche, en général d'une manière bénéfique, des autres couples parasites.

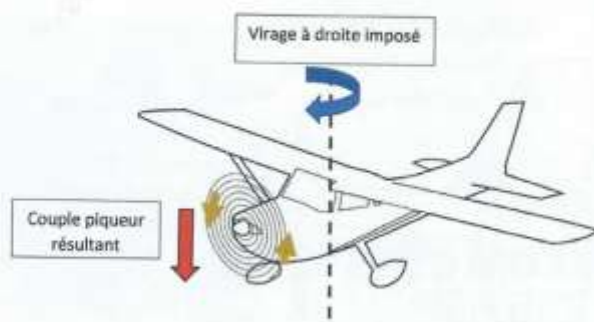


Figure 8. Si virage à droite imposé, alors couple gyroscopique piqueur.



Figure 9. Si mouvement à cabrer imposé, alors tendance à un départ du capot vers la droite.

3.1. La tendance à cabrer ou à piquer lors d'une rotation en lacet. Figure 8.

Lors d'une sollicitation en lacet ou au cours d'un virage stabilisé à droite par exemple (augmentation des caps), l'appareil est soumis à un couple piqueur. En virage à gauche, il serait soumis à un couple cabreur. Le couple lié au phénomène de précession gyroscopique est d'autant plus fort que la cadence (vitesse de variation des caps) est rapide. A très basse vitesse ce couple, cabreur ou piqueur, est plus difficile à contrer, la gouverne de profondeur pouvant même s'avérer insuffisante si le mouvement est très rapide.

3.2. La tendance à prendre un mouvement de lacet lors d'une rotation en tangage. Figure 9.

Lors d'un mouvement en tangage, volontaire ou non, le couple gyroscopique tend à produire un écart de cap. Par exemple sur les

appareils à train classique (D 112) équipés de moteurs Lycoming ou Continental, la mise en ligne de vol lors de l'accélération au décollage (diminution d'assiette) tend à produire une embardée à gauche d'autant plus violente que la rotation d'assiette est rapide.

B. Cinq cas de pertes de contrôle dues en partie aux effets moteur tableau ci-dessous

1. Accident d'un Cirrus SR 22 à Aix les Mille (13)

Lien #3 sur notre site

Au cours d'un rebond par fort vent et dans une atmosphère turbulente le pilote a remis les gaz. Surpris par les effets moteur qui ont amplifié la perte de contrôle notamment en roulis, le pilote n'a pas pu contrer l'inclinaison à gauche. Ensuite l'augmentation d'assiette a conduit au décrochage. Le BEA signale qu'en 2013 déjà le NTSB avait signalé une vingtaine de cas similaires, liés à des pertes de contrôle dues à l'intensité particulière des effets moteurs sur les Cirrus SR20 et SR22. Le BEA avait alors recommandé que l'AESA impose une formation spécifique pour les Cirrus. Les effets moteurs importants, et d'origines différentes (voir § A. ci-dessus), ont pu se cumuler et surprendre un pilote moyennement expérimenté, incapable de se défendre à très basse vitesse.

2. Accident d'un Tecnam P2002 à Beauvais (60)

Lien #4 sur notre site Lors d'une remise de gaz après un rebond, l'élève ne parvient pas à corriger un départ en lacet à gauche, compatible avec l'effet du souffle hélicoïdal de l'hélice, et une inclinaison à gauche résultant probablement du couple de renversement. Le BEA rappelle que

l'application de la pleine puissance [c'est-à-dire en conditions critiques, basse hauteur, basse vitesse] doit être faite doucement tout en contrant rigoureusement les effets moteur.

3. Accident d'un Jodel DR 1053 à Villefranche-de-Rouergue (12)

Lien #5 sur notre site

Lors du premier vol en solo, une élève se présente correctement pour un posé-décollé et atterrit normalement. L'avion redécôle immédiatement pour une cause inconnue. Il prend alors brutalement une forte assiette à cabrer, s'incline à gauche et dévie à gauche. Il heurte un arbre. Le BEA signale que la perte de contrôle est «...vraisemblablement liée aux effets moteur générés par la mise en puissance rapide...».

La remise en puissance trop brutale demandée immédiatement par radio par l'instruc-

Date	Avion	Circonstances	Cause essentielle	Domages
1 11/05/13	Cirrus SR22	Remise de gaz après un rebond	Pilote surpris par l'intensité des effets moteur	Pilote décédé, un passager blessé, avion détruit
2 20/08/14	Tecnam P2002	Remise de gaz après un rebond	Effets moteurs mal corrigés par un élève peu expérimenté	Avion fortement endommagé
3 03/08/16	DR1053	Remise de gaz après un posé-décollé	Effets moteurs mal corrigés par une élève peu expérimentée	Pilote décédée, avion détruit
4 31/05/19	Cessna 172	Remise de gaz après une présentation trop longue, trop haut	Effets moteur mal corrigés après un cafouillage en cabine	Avion détruit
5 31/08/19	Cirrus SR20	Ajustage de la puissance trop important en finale	Perte de contrôle à basse vitesse due aux importants effets moteur	Pilote et passagers blessés, avion détruit

teur, lorsqu'il a assisté du sol au redécollage intempestif de l'avion, a probablement provoqué les violents effets moteur qui ont conduit à la perte de contrôle en roulis et en lacet à très basse vitesse. Lors des posés-décollés l'instructeur conseillait pourtant de procéder en deux temps avant d'atteindre la pleine puissance afin de mieux pouvoir contrôler les effets moteur.

4. Accident d'un Cessna 172 à Tours Val de Loire (37)

[Lien #6 sur notre site](#)

Un cafouillage en cabine, entre le pilote et le passager également pilote lors d'un atterrissage trop long, fait perdre un temps précieux pour prendre les décisions adaptées, notamment celle de la remise de gaz. Elle n'a lieu seulement que lorsque la vitesse a bien régressé et que l'avion commence à s'incliner à gauche apparemment entraîné par le cumul conjugué des couples parasites évoqués ci-dessus. Les commandes de vol sont alors devenues inefficaces et l'avion décroche.

5. Accident d'un Cirrus SR20 au Mans-Arnage (72)

[Lien #7 sur notre site](#)

Un scénario très semblable à celui du cas n°1 où un autre Cirrus avait été accidenté après une perte de contrôle, près du sol et à très basse vitesse, due aux importants effets moteurs sur ce type d'avion. Dans notre numéro *Info-Pilote* 721 d'avril 2016, dans l'article « Pleins gaz à basse vitesse », nous avons attiré l'attention de nos lecteurs sur la possibilité de défense aux ailerons de quelques appareils connus face au couple moteur à pleine puissance et au voisinage de la vitesse de décrochage. Le Cirrus avec ses petits ailerons apparaissait parmi les moins bien lotis et nécessitait de ce fait

une attention particulière à basse vitesse.

Dans le cas présent, il semblerait que le pilote ait trop attendu (alarme de décrochage) avant de corriger sa trajectoire finale. Les corrections de puissance nécessaires devenaient alors trop importantes pour une vitesse aussi basse. Le manque d'entraînement récent du pilote sur cet appareil un peu plus exigeant que la moyenne, avec un peu de vent de travers, semble avoir contribué à la perte de contrôle.

C. Quelques recommandations afin d'éviter de perdre le contrôle à basse vitesse, trahi par la violence des effets moteur

1. Quand vous devez être lâché sur un nouvel appareil, surtout si la puissance installée est relativement plus importante que celles auxquelles vous êtes habitué, faites une prise en main complète. Demandez, si ça ne fait pas partie du programme, de vous montrer puis de vous faire piloter l'avion à basse vitesse, en simulant une remise de gaz à pleine puissance. N'oubliez pas le rôle prépondérant de la bille pour assurer la symétrie du vol.

2. A très basse vitesse, accoutumez-vous à des amplitudes aux commandes (notamment lacet et roulis) bien plus importantes que dans le domaine de vol usuel. Certains accidents ci-dessus semblent découler d'une insuffisance de la correction alors que le pilote avait bien détecté l'écart et le sens de l'action à effectuer.

3. Manœuvrez doucement la commande de puissance surtout quand vous disposez de 200 ou 300 ch sur un quadriplace. Le couple de renversement en roulis, dû à l'inertie du moteur (voir

§ 2.1. ci-dessus), s'en trouvera atténué et, même si la puissance arrive avec 1 ou 2 secondes de retard, ça n'est pas trop grave et surtout elle sera plus facile à contrôler. Vous pourrez ainsi mieux doser la correction à apporter avec les commandes de vol.

4. Soyez conscient des tendances que vous rencontreriez dans une situation critique, celle où vous auriez besoin de puissance à basse vitesse (sortie d'un décrochage par exemple). Sur la plupart de nos petits avions à moteur Lycoming, les échappées ont lieu vers la gauche (lacet et roulis). Mais ça n'est pas une règle ! Sur les appareils équipés d'un moteur dérivé du VW, la rotation a lieu en sens inverse (à gauche vue de la place pilote). Sur beaucoup d'appareils anciens aussi (par exemple Stampe SV4). Sur les moteurs équipés de réducteurs, le vilebrequin et l'hélice tournent en sens inverse et les deux couples de précession gyroscopique se compensent

en partie. En revanche, une hélice attelée à un réducteur est soumise à un couple aérodynamique plus important : réducteur 1:2, couple de renversement multiplié par 2.

5. Sur des appareils prototypes, pensez aux effets moteur. Lors de premiers vols ils ont parfois dépassé l'autorité des gouvernes et produit des accidents. Dégrossissez une correction avant le premier vol en décalant les axes du moteur selon des conseils experts. Ensuite, au cours du premier vol, soyez vigilant lors du décollage. Interrompez franchement en cas de comportement inquiétant. Puis au cours du vol détectez-les à pleine puissance et avec une hauteur de sécurité. Soyez prêt à réduire la puissance en cas de comportement anormal. Notez leur intensité (écarts traduits par la bille ou par une inclinaison intempesitive) et leur sens (lacet à droite ou à gauche, roulis à droite ou à gauche, tangage à cabrer ou à piquer). ●