



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

Dégradation des performances en croisière, en air agité ou instable

Vous avez tous remarqué que les vols d'été, notamment dans les basses couches de l'atmosphère, dégradent les performances en croisière. Raisons et conséquences.

Les raisons qui sont multiples et toujours susceptibles de se cumuler ont pour conséquences :

- une diminution de la vitesse propre moyenne (sans tenir compte des effets du vent) à puissance affichée constante ;
- donc une consommation/distance accrue et une diminution de la distance franchissable.

Trois raisons principales expliquent une telle dégradation :

1. des actions correctives nombreuses, nécessaires sur les 3 axes, afin de maintenir l'attitude et l'altitude de l'avion, et qui introduisent de la traînée à chaque mini-manœuvre des gouvernes de vol ;
2. une succession de montées et de descentes, par rapport aux masses d'air animées d'une vitesse verticale et ce, afin de maintenir une altitude ou un niveau constant(e). Dans un cas comme dans l'autre (montée ou descente), l'avion ne fonctionnera pas forcément à sa vitesse de consommation/distance la plus faible. En moyenne pour la totalité du voyage, elle sera toujours plus forte que celle d'une croisière stabilisée, effectuée au point préconisé par le constructeur ;
3. un rendement variable de l'hélice, qui tout comme celui de la cellule, est maximum pour une incidence des pales précise. La rencontre avec des masses d'air en mouvement modifie l'incidence et, que les mouvements de l'air soient montants ou descendants, ils éloignent l'hélice de son rendement maximum.

Afin d'étayer notre propos, nous examinons le poids que peut peser chacune des trois raisons sur la consommation en croisière.

1 La traînée de correction introduite par les gouvernes

Les gouvernes sont manœuvrées fréquemment quand la turbulence se manifeste sous la forme de petites rafales courtes et peu amples. On a l'impression de rouler sur une route cahoteuse en voiture. Ce type de turbulence est caractéristique du mouvement anarchique de l'air les jours venteux et dans les basses couches. Au cours du vol, l'instructeur recommande souvent au débutant de ne pas trop agiter les commandes de vol « Arrête de faire de la mayonnaise... ». Si effectivement l'élève a plutôt tendance à trop corriger les écarts de l'avion, il pénalise la vitesse (traînée des gouvernes, variations d'incidence). On juge en effet nécessaire, au début quand on apprend à piloter, de ramener les écarts (assiette, inclinaison, écart de cap) à zéro, sans attendre qu'une nouvelle perturbation s'en charge ce qui est pourtant en général le cas.

Selon le type de vol, l'art du pilotage s'exercera différemment. Par exemple au cours d'un voyage avec des passagers, le rôle du pilote consistera plutôt à chercher à effacer l'inconfort dû à la turbulence par des actions douces et peu fréquentes. Au cours d'un vol d'essai, le pilote au contraire corrigera très fréquemment ses paramètres afin de

ne tolérer aucun écart pour bien respecter les consignes de l'ordre d'essai. S'il faut travailler à niveau de vol absolument constant, on assistera à de fréquentes et mini-corrrections à la profondeur qui rendront le vol plutôt « secoué » et qui auront une conséquence directe sur la traînée, donc sur la consommation et sur la vitesse propre moyenne. Le recours au pilote automatique est une solution qui n'est pas exempte de conséquences sur la consommation. L'acharnement du pilote automatique à stabiliser l'appareil n'est pas compatible avec des considérations écono-

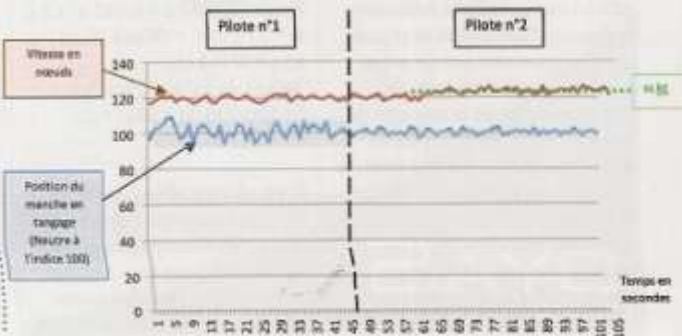
miques. Un peu comme votre régulateur de vitesse sur votre voiture qui sollicite inutilement le moteur pour conserver la vitesse dans la côte et freine dans la descente. Le conducteur plus avisé qui utilise habilement l'énergie acquise dans la descente pour franchir la côte en souplesse réalisera une bien meilleure consommation. On examinera ce bilan dans le paragraphe suivant. En ce qui concerne le coût sur la traînée, lié à l'utilisation des gouvernes, un extrait d'enregistrement du braquage de la gouverne de profondeur en atmosphère agitée, avec deux types de

Figure 1. Rôle du pilote dans l'établissement de la vitesse en atmosphère turbulente, en basse couche, un jour très venteux. (Enregistrement effectué en 1996 sur le prototype Hirsch TBH 20)

De 0 seconde à 46 secondes : le premier pilote corrige d'instinct, sans s'appliquer particulièrement, les perturbations sur les 3 axes de l'avion (seule la position de la commande de tangage est enregistrée, indice possible de 80 à 120). La vitesse propre (ici vitesse indiquée) se stabilise à 120 kt.

De 46 secondes à 106 secondes : le deuxième pilote s'efforce de corriger au minimum les écarts sur les 3 axes. Pendant une vingtaine de secondes la vitesse indiquée augmente significativement d'environ 2 à 3 nœuds et se stabilise durablement à 123 kt. Soit plus de 2 % gagnés sur la vitesse de croisière et autant sur la distance franchissable uniquement par une meilleure finesse du pilotage.

A noter que 123 kt est aussi la vitesse obtenue en air calme. D'où la très faible pénalisation introduite par les actions du pilote n°2.



SÉCURITÉ

pilotages successifs, nous révèle des résultats intéressants quant à la conséquence sur la vitesse propre. Une utilisation plus mesurée des gouvernes (ici seule la position de la gouverne de profondeur est enregistrée mais toutes sont activées) permet de gagner quelques nœuds sur la vitesse propre, donc d'économiser du carburant et d'accroître la distance franchissable. **Figure 1.**

2 Le bilan de consommation montées/descentes, en air instable, comparé à celui du vol en atmosphère stable

Il s'agit plutôt d'examiner le bilan de la diminution de la vitesse, ou de l'augmentation du temps de vol, lors de la traversée de grandes masses d'air, ascendantes ou descendantes bien individualisées, comme le sont les thermiques pendant l'été. Le pilote ne peut en rien, s'il maintient son altitude, réduire la consommation, il doit seulement savoir évaluer la conséquence de la surconsommation éventuelle pour un voyage donné.

Autrefois on conseillait aux pilotes d'exploiter les ascendances rencontrées afin de gagner un peu d'énergie potentielle pour ensuite accepter de se laisser descendre quand on rencontrait une masse d'air descendante, technique qui réduisait la consommation à qui savait bien exploiter les masses d'air ascendantes. On modifiait sa route au gré des thermiques, comme les pilotes de planeurs... Mais aujourd'hui la trajectoire du voyage et l'altitude sont en général imposées, avion le plus souvent à vario constant. Si l'on affiche une puissance constante (pression d'admission et régime moteur constants sur un avion équipé d'une hélice à pas variable, position de la manette de puissance fixe sur un appareil équipé d'une hélice à pas fixe), la croisière en air calme s'effectue avec une vitesse propre théoriquement constante.

Mais pour rester à altitude constante, si l'avion traverse :

- une masse d'air montante, il

aura tendance à monter et le pilote devra diminuer l'incidence. Si la puissance n'est pas réduite la vitesse propre va augmenter et la consommation/distance diminuera, situation intéressante pour la consommation;

- une masse d'air descendante, il aura tendance à s'enfoncer et le pilote pour maintenir l'altitude constante devra augmenter l'incidence. A puissance fixe, la vitesse diminuera et la consommation/distance augmentera. Dans les deux cas, le pilote choisira une incidence différente de celle qui correspondait par définition, à l'incidence de distance franchissable maximale en air calme.

Exemple numérique, figure 2 :

Un Robin DR 400-120 ch effectue un voyage de 200 km. VP = 185 km/h (51 m/s); masse 900 kg; poids de l'avion $mg = 9\,000\text{ N}$; finesse f à 185 km/h = 10 (valeur qui varie peu et que l'on conservera entre 154 et 216 km/h dans les calculs qui suivent); surface alaire $S = 13,6\text{ m}^2$; masse volumique de l'air $\rho = 1,2\text{ kg/m}^3$

a. en air calme

b. dans un air instable avec ascendances et descentes de vitesse verticale moyenne $\pm 2\text{ m/s}$

a. en air calme :

Puissance utile nécessaire au vol, vitesse et temps de vol pour 200 km ?

Puissance nécessaire au vol :

$P_n = C_x \cdot (\rho \cdot V^3 / 2) \cdot S$ (équation de propulsion)

Calcul de C_x : $C_x = C_z / f = ?$

Calcul de C_z : $C_z = (2 \cdot mg / \rho \cdot V^2)$

$S) = (2 \times 9000 / (1,2 \times 51^2 \times 13,6)) = 0,42$

d'où $C_x = C_z / f = 0,42 / 10 = 0,042$

Finalement : $P_n = 0,042 \times (1,2 \times 51^3 / 2) \times 13,6 = 45\,462\text{ W}$ ou 45,4 kW (62 ch)

Temps de vol à 185 km/h :

$t = 200\,000 / 51 = 3\,921\text{ s}$ ou

65 minutes.

b. en air instable :

On supposera que l'avion passe la moitié du temps de vol dans des ascendances de $+2\text{ m/s}$ et l'autre moitié dans des zones descendantes à -2 m/s . Schéma

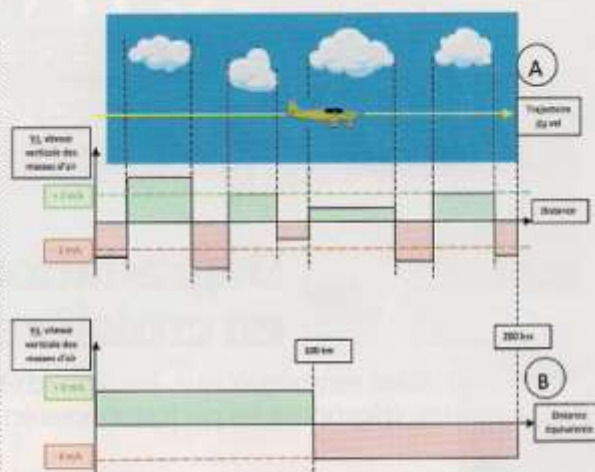


Figure 2. Schématisation des masses d'air en fonction de leur vitesse verticale Vz
Le voyage en atmosphère instable (figure 2.A) est une succession de renoncées, soit avec des masses d'air ascendantes (en vert), soit avec des masses d'air descendantes (en rose). En atmosphère instable, par exemple dans les basses couches et sous les cumulus, on rencontre rarement des masses d'air immobile ! En regroupant en deux masses d'air de 100 km chacune, l'une montante, l'autre descendante, on simplifie l'explication du calcul des temps de vol (figure 2.B). A noter le principe de la conservation de la masse d'air : il impose l'égalité des aires vertes et des aires roses. Tout ce qui descend doit monter et inversement !

représentatif (figure 2.B) d'un vol dans une zone instable de thermiques, l'été.

- 100 km de vol dans des ascendances à $V_z = +2\text{ m/s}$: Puissance et temps de vol ?

Les ascendances de $+2\text{ m/s}$ transfèrent une puissance supplémentaire ΔP_1 à l'avion (si l'avion montait il utiliserait cette puissance mais comme il reste en palier il la transforme en vitesse). Elle vaut : $\Delta P_1 = mg \cdot V_z = 9000 \times 2 = 18\,000\text{ W}$ ou 18 kW (24 ch). Cette puissance s'ajoute aux 45,4 kW de puissance nécessaire P_n délivrée par le propulseur. (En réalité le moteur délivre une puissance utile P_u supérieure et à cause du rendement de l'hélice, seule une partie de cette puissance participe effectivement à la propulsion). Dans l'ascendance, l'avion dispose donc de :

$P_1 = 45,4 + 18 = 63,4\text{ kW}$ ou 63 400 W (Cet excédent de puissance est à l'origine de l'accélération que l'on ressent quand on rentre dans une « pompe » alors que l'on s'efforce de maintenir l'altitude, en planeur comme en avion).

L'équation de propulsion est modifiée : $P_1 = P_n + \Delta P_1 = C_x \cdot (\rho \cdot V_1^3 / 2) \cdot S$

D'où $V_1 = \text{racine cubique} (2 \cdot P_1 / C_x \cdot \rho \cdot S) = (2 \cdot P_1 / C_x \cdot \rho \cdot S)^{1/3}$

$V_1 = (2 \cdot 63400 / (0,042 \cdot 1,2 \cdot 13,6))^{1/3} = 56,7\text{ m/s}$ ou 204 km/h

Il faut corriger itérativement C_z et C_x qui étaient calculés pour 51 m/s. Nouveau calcul :

$C_z = (2 \times 9000 / (1,2 \times 56,7^2 \times 13,6)) = 0,34$ d'où pour $f = 10$, $C_x = 0,034$

Nouvelle valeur de V_1 :

$V_1 = (2 \cdot 63400 / (0,034 \cdot 1,2 \cdot 13,6))^{1/3} = 61\text{ m/s}$ ou 219 km/h

Temps t_1 corrigé : $t_1 = 100000 / 61 = 1639\text{ s}$ ou 27 minutes.

- 100 km de vol en zones descendantes à $V_z = -2\text{ m/s}$: Puissance et temps de vol ?

En zone descendante l'avion perd une puissance ΔP_2 équivalente à celle qu'il gagnait dans l'ascendance mais cette fois-ci elle se soustrait du bilan de puissance. La puissance de propulsion devient :

$P_2 = P_n - \Delta P_2 = 45,4 - 18 = 27,4\text{ kW}$ ou 27 400 W. L'avion décélère alors vers V_2 .

L'équation de propulsion est modifiée : $P2 = Pn - \Delta P2 = Cx \cdot (\rho \cdot V2^3 / 2) \cdot S$

D'où $V2 = \text{racine cubique}(2 \cdot P2 / Cx \cdot \rho \cdot S) = (2 \cdot P2 / Cx \cdot \rho \cdot S)^{1/3}$

$V2 = (2 \cdot 27400 / 0,042 \cdot 1,2 \cdot 13,6)^{1/3} = 43 \text{ m/s}$ ou 154 km/h

Il faut corriger itérativement Cz et Cx calculés pour 51 m/s :

$Cz = (2 \times 9000 / 1,2 \times 43^2 \times 13,6) = 0,6$ et pour $f = 10$ on aura $Cx = 0,06$

Nouvelle valeur de $V2$:

$V2 = (2 \cdot 27400 / 0,06 \cdot 1,2 \cdot 13,6)^{1/3} = 38 \text{ m/s}$ ou 137 km/h

Temps $t2$ corrigé : $t2 =$

$100000 / 38 = 2631 \text{ s}$ ou

44 minutes.

• Bilan de 200 km en air instable :

En air calme, pour 200 km, le temps de vol t valait 65 minutes ou 32,5 minutes par tranche de 100 km.

En air instable le temps total de vol $t' = t1 + t2$ vaut :

$t' = 27 + 44 = 71 \text{ minutes.}$

Soit 6 minutes de plus qu'en air calme.

La modération et la vraisemblance des hypothèses choisies pour cet exemple (ascendances et descendances permanentes de $\pm 2 \text{ m/s}$, avion de faible puissance) montre bien que la lutte contre la tendance à descendre en atmosphère instable dégrade fortement les performances moyennes d'un avion léger.

Contrairement à certaines idées reçues, les deux effets ne se compensent pas. On gagne un peu de temps en zone d'ascendances de 100 km (ici $32,5 - 27 = 5,5 \text{ minutes}$). En revanche le maintien de l'altitude en zone descendante de 100 km se traduit par une vitesse moyenne réduite qui allonge significativement le temps de vol : $44 - 32,5 = 11,5 \text{ minutes.}$

Un allongement de 6 minutes du temps de vol (+ 9 %) peut créer des surprises à celui qui n'aurait pas prévu le délestage en conséquence. Traduite en pourcentage ou en kilomètres la réduction de distance franchissable due à l'instabilité atmosphérique peut valoir 9 % soit 18 km ou 10 NM pour un voyage de 200 km.

À méditer quand on sait qu'il

manque parfois seulement 3 kilomètres pour atteindre l'aérodrome. Remarque qui ne présume en rien des causes de l'accident ci-dessous choisis pour illustrer les pannes sèches à proximité de l'arrivée.

(voir lien #1 sur notre site)

3 La modification du rendement de l'hélice

Peu de données chiffrées sur la perte du rendement provoquée par la rencontre avec des masses d'air montantes, descendantes ou animées d'une vitesse horizontale, existent. Parfois sur les grandes hélices des bruits inhabituels témoignent de la rencontre avec la turbulence atmosphérique. Mais pas d'étude chiffrée exploitable et disponible à ce jour. Parfois quand les bruits deviennent trop inquiétants, en atmosphère très agitée, on a tendance à réduire d'instinct le régime de l'hélice ce qui diminue la vitesse propre et va dans le bon sens, à la fois pour la sécurité du vol (respect de VNO) et aussi pour le confort. Mais être obligé de trop réduire la vitesse de croisière peut conduire à utiliser l'avion au-dessous de sa vitesse de distance franchissable maximale et finalement avoir des conséquences directes sur la possibilité d'atteindre l'aérodrome de destination. La consultation du manuel de vol, chapitre « Performances », vous indique quelle perte de distance franchissable vous subiriez si vous deviez réduire significativement la vitesse. On s'en préoccupe à la préparation du vol.

Conclusion, recommandations

• **Plusieurs raisons**, qui se cumulent la plupart du temps, allongent la durée du vol en atmosphère agitée, turbulente ou instable.

• **En s'efforçant de « piloter fin »** on limite la perte en atmosphère turbulente, turbulence non organisée. Mais en zones bien individualisées, de masses

d'air montantes ou descendantes, on perdra obligatoirement de la distance franchissable si l'on doit rester à altitude constante.

• **Selon la sévérité des phénomènes** (turbulence des basses couches, grands mouvements de convection thermique, rencontres conflictuelles de masses d'air...), l'allongement sera plus ou moins perceptible.

• **Pour les avions faiblement motorisés**, la difficulté à maintenir l'altitude en zone descendante se traduira par un allongement de la durée du vol plus important que sur un avion plus puissant ou plus rapide.

• **L'obligation de réduire la vitesse** (respect de VNO ou moins si les conditions de confort l'exigent) peut faire voler l'avion à une vitesse inférieure à celle de distance franchissable maximale.

• **La connaissance de l'avion et la consultation de l'instructeur**, en cas de doute, vous éviteront de vous faire surprendre avec des réserves en carburant insuffisantes alors que par temps calme elles assuraient le voyage en toute sécurité et en conformité avec les règles d'emport du carburant. A titre d'exemple le cumul des pénalisations décrites ci-dessus (2 % pour un pilotage brutal, 9 % dû à l'instabilité de la masse d'air) représente des ordres de grandeur réalistes qui nécessitent d'envisager des temps de voyage plus longs en atmosphère turbulente ou instable lors de la préparation du vol.

• **Bien qu'aucun cas d'accident lié à une panne sèche**, due exclusivement à l'agitation atmosphérique ne soit rapporté, on ne peut exclure qu'elle ait joué le rôle d'un facteur aggravant dans certains incidents ou accidents. ●