PAR MICHEL BARRY
Pilote professionnel, ingénieur aéronautique

Sécurité

De l'influence du gradient de vent sur l'approche et la montée

Soumis à des variations de vent à basse altitude, un pilote peut enregistrer des modifications de performances au décollage et risque une perte de contrôle en finale.

L'influence du vent sur les comportements, en descente et en montée, de nos petits avions est un perpétuel sujet de discussions techniques. Certains affirment que le vent n'a aucune influence sur la vitesse ascensionnelle Vz (le vario) car, expliquent-ils, «l'avion est dans la masse d'air et se moque du vent». D'autres relatent que «vent de face, ça monte mieux que vent arrière…», ils l'ont mesuré !

Qui a raison ? Comment se comporte un avion soumis au vent, en approche et en montée ?

Cette difficulté à comprendre pourquoi le vario est meilleur en montée face au vent que vent dans le dos s'explique par le phénomène de «gradient de vent». Si ceux qui affirment que le vent n'a aucune influence sur les performances en montée ont bien raison dans des couches de l'atmosphère au sein desquelles la vitesse du vent ne varie pas brutalement en fonction de l'altitude, en revanche ils ont tout faux par fort vent dans l'axe au voisinage du sol dans les couches où la vitesse du vent varie beaucoup en quelques mètres de différence de hauteur !

A – Le «gradient de vent»

1. Description du «gradient de vent»

L'air est un fluide visqueux ce qui n'apparaît pas au Terrien d'une façon évidente. Mais le phénomène est bien réel. Au voisinage du sol, même lisse et sans obstacles (imaginez une grande plaine que le vent balaye) le vent est quasi nul au sol car l'air «frotte sur le sol» à cause de sa viscosité (mettez-vous à plat ventre, vous ne ressentez plus le vent). A deux mètres du sol il commence à être plus violent. Et ainsi de suite dans les différentes couches que l'on rencontre en s'élevant. Le vent ne retrouve une valeur quasi constante qu'à une hauteur élevée (plusieurs centaines de mètres). Et si vous montez encore, il continue à forcir un peu.

La direction du vent varie aussi.

La représentation des intensités et direction du vent par des vecteurs prenant leur origine sur la même verticale constitue la «Spirale d'Eckman» (*figure 1, ci-dessous*).

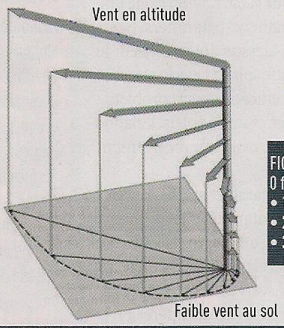

FIGURE 1 : SPIRALE D'ECKMAN
Du sol, où il est quasi nul, jusqu'en altitude, où il forcit, le vent tourne à droite dans l'hémisphère nord.
Son cap augmente.
Cette rotation due aux forces de Coriolis et à la viscosité de l'air peut accentuer l'effet de gradient en finale, la composante du vent sur la trajectoire pouvant même parfois devenir «arrière» en courte finale.

Dans ce qui suit, seule la composante du vent sur la trajectoire en principe rectiligne de l'approche finale nous intéresse.

Le «profil de vitesse» prend la forme de la figure 2. Il caractérise l'aptitude du vent à forcir quand on s'élève.

On appelle «gradient de vitesse du vent» ou simplement «gradient de vent» la variation de vitesse ΔV du vent par rapport à l'altitude Z (ΔZ la variation d'altitude) à une altitude ou à une hauteur données. ΔV/ΔZ ou dV/dZ qui s'exprime en mètres par seconde par mètre d'altitude.

Comme le montre la figure 3, le gradient de vent augmente quand on se rapproche du sol.

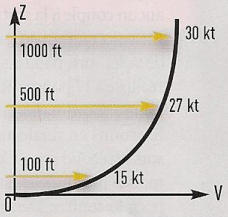

FIGURE 2 : EXEMPLE DE PROFIL DE VITESSE DE 0 ft à 1 000 ft
- 15 kt à 100 ft.
- 27 kt à 500 ft
- 30 kt à 1 000 ft

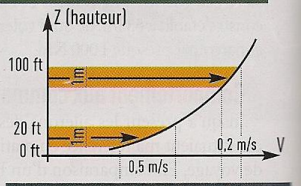

FIGURE 3 : DIMINUTION DU GRADIENT DE VENT AVEC LA HAUTEUR
- à 20 ft : ΔV/ΔZ = 0,5 m/s par mètre.
- à 100 ft : ΔV/ΔZ = 0,2 m/s par mètre.

Gagner 0,5 m/s si on s'élève d'1 mètre représente un gradient de 0,5 m/s par mètre d'altitude ce qui peut être considéré comme un fort gradient.

On trouve de telles valeurs dans des vents moyens (10 à 30 kt) et au voisinage du sol.

Au contraire 0,5 m/s sur une tranche d'altitude de 100 m donne un gradient de 0,005 m/s par mètre d'altitude et représente un faible gradient tel que celui qu'on peut rencontrer même par vent fort au-dessus de 200 m de hauteur.

Dans les deux cas on a pris la même variation d'altitude ou de hauteur (1 mètre) mais pas la même variation de vitesse (0,5m/s et 0,2 m/s) ce qui modifie la valeur du gradient.

2. Danger des couches à «fort gradient» en approche finale

Un avion, comme tout mobile dont le mouvement est régi par les lois élémentaires de la mécanique galiléenne ou newtonienne, a tendance à

conserver sa vitesse dans un repère dit « galiléen » qui peut être confondu avec la Terre pour l'exemple qui va suivre.

Pour accélérer un tel mobile, ou pour le ralentir, il faut modifier la force de propulsion. En l'augmentant on accélère, et en la diminuant ou en freinant on ralentit.

L'avion qui traverse un gradient de vent en finale subit quasi simultanément au moins 7 phénomènes cinématiques et dynamiques liés :

- Une perte instantanée de vitesse propre Vp due à la diminution de la vitesse du vent W.
- Une perte de portance due à la diminution de Vp (la portance n'est plus égale à son poids).
- Un accroissement de sa vitesse de chute Vz dû au déséquilibre portance < poids.
- Une modification de sa trajectoire liée à l'accroissement de Vz.
- Une légère diminution de sa trainée due à la diminution de Vp.
- Une faible réaccélération due au déséquilibre traînée < traction du moteur.
- Une faible réaccélération due au fait que l'avion est passé sur une pente plus forte.

Pour comprendre l'importance relative de ces phénomènes rien ne vaut un exemple concret :

On imagine un avion en finale à Vp = 100 kt (50 m/s), face au vent d'intensité W sur un plan à 5 % donc avec un vario de l'ordre de - 500 ft/mn (2,5 m/s).

L'avion traverse une couche verticale où le gradient de vent vaut 0,5 m/s par mètre d'altitude.

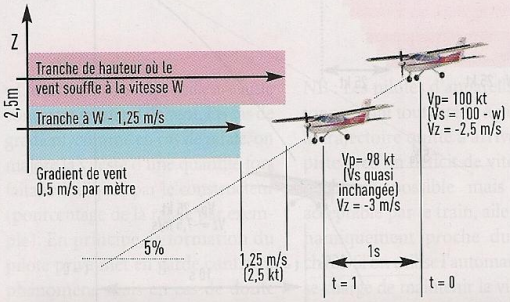

FIGURE 4 : ILLUSTRATION DE L'EXEMPLE CHIFFRÉ PENDANT LA 1re SECONDE
• à t = 0 Vp = 100 kt Vz = -2,5 m/s • à t = 1 Vp = 98 kt Vz = -3 m/s

Quelles sont les modifications de Vp et de Vz pendant la 1re seconde et au bout de 10 secondes ? Comment évolue la trajectoire ?

• Calcul de la perte instantanée de vitesse propre Vp en 1 seconde et en 10 secondes (t = 0 et t = 10)

Si l'appareil conserve sa vitesse par rapport au sol, alors sa vitesse propre Vp qui valait 50 m/s à l'instant zéro (t = 0) va être diminuée à t = 1 parce qu'en descendant de 2,5 m il va rencontrer un vent moins intense de : 2,5 m/s x 0,5 = 1,25 m/s (2,5 kt).

Sa vitesse propre Vp va passer de 50 à 48,75 m/s (de 100 kt à 98 kt). *Voir figure 4.*

En extrapolant linéairement sur 10 secondes, la perte de vitesse Vp vaudra, à raison de 2,5 kt perdus chaque seconde, 25 kt.

Vp passera donc de 100 à 75 kt. *Voir figure 5 page suivante.*

Car, comme on va le justifier plus loin, l'avion, en 10 secondes de descente dans un gradient, n'aura pas le temps d'accélérer significativement.

• Calcul de la perte de portance due à la diminution de Vp (la portance n'est plus égale à son poids)

A t = 0 la portance est proportionnelle à Vp au carré soit à une valeur de 50^2 = 2 500 (peu importent les unités).

A t = 1 la portance est proportionnelle à $48{,}75^2$ = 2 376.

En 1 seconde la portance a diminué dans un rapport de 2 376/2 500 = 0,95 soit 5 %.

L'équilibre du vol selon un axe vertical n'est plus assuré car si à 100 kt (50 m/s) la pression dynamique était suffisante pour assurer une portance égale au poids de l'appareil, 1 seconde plus tard il manque 5 % à la portance.

• Calcul de l'accroissement de sa vitesse de chute Vz dû au déséquilibre portance < poids

Perdre 5 % (0,05) de la portance si le facteur de charge vaut 1 à g = 9,81 m/s2 représente un accroissement de la vitesse de chute de : 0,05 x 9.81 = 0,5 m/s qui vient se rajouter négativement au vario et incurve la trajectoire vers le bas.

• Calcul de la modification de sa trajectoire dans la première seconde et 10 secondes plus tard (t = 1 et t = 10)

Il s'ensuit une modification de la pente de 0,5/50 = 0,01 soit 1% (diminution de 1 %).

Si le pilote ne réagissait pas, le même phénomène se reproduirait dans la seconde qui suit et ainsi de suite.

A raison de 1% de diminution de pente par seconde, on peut s'attendre à passer de la pente d'approche correcte à 5 % à une pente de 15%, dix secondes après si, bien entendu, aucune action corrective du pilote n'intervient. *Voir figure 5.*

• Calcul de la faible réaccélération (en 1 seconde) due au déséquilibre traînée < traction du moteur (toujours sans action du pilote)

Cette démonstration serait incomplète si elle ne tenait pas compte de la réaccélération naturelle de l'avion « déventé ».

En effet lorsque l'avion va être soumis à une diminution de Vp (à cause du gradient de vent) sa force propulsive (traction du moteur ou/et composante du poids sur le plan de descente pour un planeur), son équilibre propulsif (traction moteur = traînée) n'est plus assuré ce qui se traduit par une tendance à accélérer.

Sur le plan à 5% la force propulsive à t = 0 vaut 5% du poids de l'avion.

La diminution de traînée due à la diminution de vitesse est proportionnelle à la diminution relative de pression dynamique.

Elle vaudra donc 5% de 5% du poids

soit (0,05 x 0,05 = 0,00025) soit environ 2/10 000 e de traînée en moins. Ils auront bien peu d'influence sur la capacité de l'avion à réaccélérer et à retrouver rapidement Vp = 50 kt. C'est la raison pour laquelle on les néglige dans le raisonnement et on considère que la vitesse perdue pour cause de gradient sévère ne se rattrape pas instantanément même si l'avion commence un peu à réaccélérer.

• Calcul de la faible réaccélération due au fait que l'avion est passé sur une pente plus forte

Même raisonnement : modifier la pente de 1% produit une accélération de 1% x 9,81 m/s2 soit 0,1 m/s (0,2 kt) en 1 s ce qui compense peu les 2,5 kt perdus pour cause de déventement.

Conclusion :

Si un avion en approche à 100 kt sur un plan à 5% (Vz = -500 ft/mn ou -2,5 m/s) traverse une couche où le gradient de vent est de l'ordre de 0,5 m/s par mètre de hauteur (fort gradient), sans correction de la part du pilote :

• au bout de 10 secondes la vitesse peut diminuer jusqu'à 75 kt.

• au bout de 10 secondes la vitesse de chute peut atteindre -7,5 m/s (-1 500 ft/mn).

• au bout de 10 secondes la pente peut s'infléchir jusqu'à 15% et ce à assiette constante ce qui n'alerte pas immédiatement le pilote !

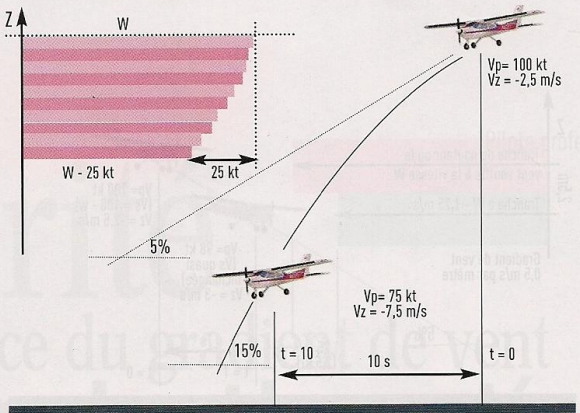

FIGURE 5 : de t = 0 à t = 10.
Mécanisme de l'accroissement de pente provoqué par un gradient de vent de 0,5 m/s par mètre. On suppose que le pilote n'a pas réagi.
(Le dessin n'est pas à l'échelle).

B – Les moyens de lutte contre les risques liés à la traversée d'une zone de gradient de vent en approche finale

D'une manière générale, avec ou sans gradient de vent, le pilote contrôle et corrige la pente et la vitesse de son appareil dans les limites que lui autorisent les caractéristiques aérodynamiques de la cellule (finesse, vitesse de chute) et la poussée disponible du propulseur.

Les risques dans une zone de gradient de vent sont ceux liés à une régression rapide de vitesse :

• La diminution rapide de vitesse Vp peut conduire au décrochage.

• L'infléchissement de la pente peut produire une trajectoire qui n'aboutira pas au seuil de piste mais pourra toucher le sol bien avant.

• L'augmentation de la vitesse de chute peut être importante au point de nécessiter l'application d'une puissance ou d'une poussée instantanée non suffisamment disponibles sur un appareil faiblement motorisé.

Ainsi, il peut exister des situations (fort gradient, faible hauteur) qui sont de véritables pièges car aucune parade, compte tenu de la vitesse Vp au moment de la rencontre du gradient de vent, ne sera efficace.

D'ailleurs même les avions de ligne, dotés de dispositifs automatiques d'approche (suivi de pente, automanette), sont parfois tout aussi impuissants dans un gradient de vent que nos petits avions.

Point de vue « énergétique » :

Le gradient de vent est perçu par l'avion-système-énergétique comme une dégradation instantanée et définitive de ses deux énergies en approche : énergie cinétique due à la vitesse et énergie potentielle caractérisée par sa hauteur. Les deux peuvent s'échanger : soit transformer l'excédent de vitesse en hauteur, soit l'excédent de hauteur en vitesse.

La hauteur étant imposée à chaque point de l'approche par la trajectoire, il n'est pas question de prendre de la marge en prévision d'un « creusement » éventuel du plan dû au gradient. En revanche, la vitesse d'approche peut être majorée par le pilote au début de la finale en fonction des conditions de vent prévues sur la trajectoire en basse hauteur.

• 1re limitation au choix d'une vitesse plus élevée que 1,3 VS : la longueur de piste.

• 2e limitation : VFE (vitesse maximale volets sortis).

D'où l'intérêt pour le pilote de bien connaître les caractéristiques, les performances, les limitations de son appareil et surtout les procédures du manuel de vol. Ainsi il saura choisir la configuration et la vitesse d'approche dont la combinaison constitue le meilleur compromis (pour une finale) destiné à combattre un fort gradient de vent.

Comment détecter le phénomène de gradient et que faire si on se fait piéger ?

Les indices :

• Au sol :

- Un fort vent laminaire de face sur un aérodrome bien dégagé produit des gradients de plus en plus forts au fur et à mesure que l'on se rap-

proche du sol.
NB : les obstacles (arbres, maisons…) désorganisent le gradient mais génèrent de la turbulence tout aussi dangereuse qui n'est pas l'objet de notre étude. Elle se combat pourtant par les mêmes actions.
- La manche à air est calme mais au-dessus de la piste les nuages bas défilent à toute vitesse. Ça va sentir le gradient en finale !

• En vol, en approche finale, le gradient de vent se manifeste par :
- Une vitesse indiquée qui, brutalement, se met à décroître lentement mais sûrement.
- Une sensation d'enfoncement à assiette constante (l'avion ne pique pas vers le sol). Attention le vario ne se manifeste pas tout de suite car il est en retard !
- Sur nos avions à hélice une baisse du régime moteur due au fait que la vitesse Vp diminue. Parfois on a l'impression que le moteur au ralenti veut caler !
- Les bruits aérodynamiques qui s'atténuent.
- Les commandes qui mollissent.
- Le plan qui se creuse dans les dernières secondes de la finale.
- Le point d'aboutissement qui remonte (donc je descends!).

Les parades :

• Une étude de la météo du jour sur le terrain de destination et une analyse des risques de gradient de vent en finale. Au-dessus de 10 kt on s'en préoccupe.

• L'anticipation est la meilleure lutte contre un gradient de vent. En cas de gradient, comme en cas de rafale, on majore la vitesse d'une quantité forfaitaire indiquée par le constructeur (pourcentage de la rafale par exemple). En principe, la formation du pilote privé met en garde contre ce phénomène mais en cas de doute parlez-en avec votre instructeur.

• La surveillance de la vitesse est vitale car plus la détection est précoce, plus la parade sera efficace.

• L'application de la puissance associée à une augmentation d'incidence est l'action curative obligatoire (compensation du déficit de portance). Mais trop tardive elle peut s'avérer insuffisante.

• Supposons qu'on soit piégé : on applique la pleine puissance mais l'avion s'enfonce quand même. On doit choisir entre la peste et le choléra ! Priorité à la vitesse ou à la trajectoire ?
- Si la marge de vitesse est confortable, V = 1,6 Vso par exemple, on peut transformer l'excédent de vitesse en réduction de l'enfoncement par une action à cabrer (manche tiré).
- Si la marge de vitesse est insuffisante, on risque de décrocher en tirant le manche et il vaut mieux accompagner la trajectoire en gardant une vitesse légèrement supérieure à Vso jusqu'à l'impact inévitable sur la piste ou avant la piste. On amortira avec un pseudo-arrondi.

NB : Les pilotes d'appareils de fort tonnage ont tout intérêt à privilégier la trajectoire quitte à arriver sur la piste avec un déficit de vitesse. Pas d'arrondi possible mais impact acceptable par le train, aile aérodynamiquement proche du décrochage. Si on utilise l'automanette qui se charge de maintenir la vitesse, on trouvera toujours la poussée nécessaire sans demander le maximum aux réacteurs.
Au contraire, le pilote de l'avion léger de 120 CV, hélice à pas fixe dispose à 1,3 Vso d'une poussée (ou traction) relativement plus mesurée. Il aura plutôt intérêt à conserver sa vitesse sans chercher à maintenir la trajectoire initiale.
De plus, une perte de contrôle, notamment en roulis, consécutive à un décrochage semble plus probable que pour un avion de ligne et elle sera bien plus préjudiciable qu'un impact prématuré avant le seuil de piste.
On ne pilote pas un DR 400 comme un Airbus ! L'idée fait son chemin alors que certains défendent la standardisation des méthodes de 1 tonne à 200 tonnes.
La discussion est ouverte une fois de plus…

C- Traversée d'un gradient de vent en montée

La démonstration chiffrée précédente peut être appliquée en changeant les signes à la montée vent de face. Dans ce cas, trouver des couches de vent de plus en plus fort donne instantanément de la vitesse à l'avion et augmente son énergie tant que le gradient existe. C'est la raison pour laquelle, face au vent, mais seulement dans un gradient de vent, l'appareil monte mieux (meilleur vario, meilleure pente).
En revanche, vent arrière et en gradient de vent, l'avion en montée est « déventé » comme l'avion en finale face au vent (voir le rapport BEA : http://www.bea.aero/docspa/2003/f-ut030924/pdf/f-ut030924.pdf) et monte moins bien. Cela peut conduire au décrochage si le pilote s'obstine à vouloir s'élever plutôt qu'à retrouver une vitesse suffisante quitte à sacrifier un peu de hauteur.Lire les conclusions du rapport dans lesquelles le gradient de vent est considéré comme un facteur aggravant.
Le changement de cap en montée provoque parfois des surprises. En effet, il peut replacer « vent dans le dos » un avion qui, 20 secondes auparavant, montait bien « vent de face ».
L'écart entre la bonification vent de face et la dégradation vent dans le dos accentue l'effet du gradient ce qui est ressenti douloureusement par les pilotes.
En zone sans gradient le phénomène n'existe pas. ●