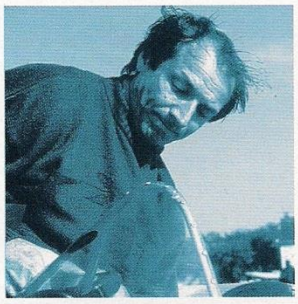


par **MICHEL BARRY**
Pilote professionnel,
ingénieur aéronautique

Un peu de mécanique du vol :

le point sur la pente et la vitesse en finale

La rubrique Sécurité du numéro 706 d'*Info-Pilote* recommandait de soigner ses paramètres d'approche, notamment en finale (pente, vitesse). Comme à chaque fois qu'il est évoqué ce problème génère des discussions et des commentaires plutôt sympathiques bien qu'il déterre immanquablement le fameux marronnier : comment corriger la pente et la vitesse en finale ?

Si la mécanique du vol est immuable, les techniques de pilotage diffèrent et se partagent en plusieurs chapelles distinctes : deux principales + une troisième qui combine les deux.

1. Le manche contrôle la pente, les gaz contrôlent la vitesse.
2. Le manche contrôle la vitesse, les gaz contrôlent la pente.
3. Une conjugaison opportune des effets utiles des deux précédentes afin de neutraliser les effets indésirables comme les trop grands écarts de vitesse par exemple. Méthode recommandée par l'ENAC (ex-SEFA).

Bien entendu les deux techniques, ou leurs variantes, étant l'une et l'autre appliquées par les écoles de pilotage du monde entier, avec le plus grand succès, il n'est pas question de demander à des pilotes qui réussissent avec l'une d'essayer de se convertir à l'autre.

Toutefois, comme de l'une ou de l'autre découlent parfois des interprétations erronées de la mécanique du vol en provenance de leurs défenseurs, il est toujours bon d'en comprendre le détail. Ces derniers peuvent en effet finir par trouver et répandre des explications simplistes, voire dangereuses, susceptibles de perturber les pilotes débutants. Afin de lever les doutes, quand ils existent, on se référera au verdict du juge : la mécanique du vol et les lois de physique qui l'accompagnent. Chacun ensuite y retrouvera sa religion et la resituera par rapport à celle de son copain converti à une autre croyance… Et si, de nouveau, le débat alimente les bars d'aéroclubs pendant les jours de pluie c'est tant mieux pour la sécurité, pourvu que l'argumentation s'appuie sur de saines fondations.

1. Pente p, vitesse de chute Vz, vitesse V, puissance utile Wu. Cas de la finale.

a. Cas général : relation entre Vz et V pour une puissance utile Wu donnée (figure 1)

À une puissance utile Wu donnée, supposée constante dans tout le domaine de vitesse entre VS et VNE, Vz et la vitesse V évoluent selon

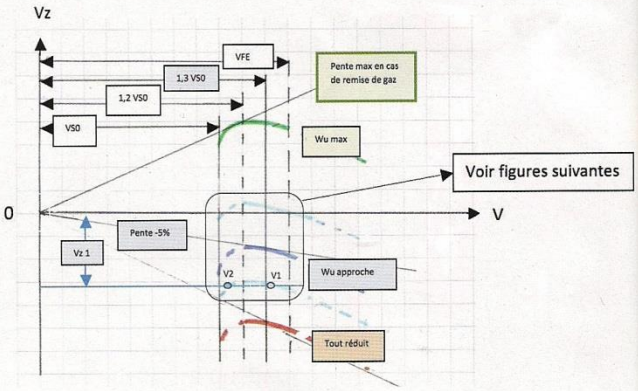


Figure 1
Polaire des vitesses : relations entre Vz et V pour 3 puissances Wu caractéristiques et en configuration atterrissage (train et volets sortis)

- en bleu foncé, la polaire des vitesses en configuration d'approche. Elle correspond à une puissance connue que le pilote préaffiche avant de commencer sa descente. En maintenant bien 1,3 VS0 le pilote est assuré de suivre une pente de descente voisine de la pente idéale de – 5 % ;
- en rouge, la polaire des vitesses "tout réduit". À 1,3 VS0, la pente est plus faible. De l'ordre de -10 à -15 % sur la plupart des avions légers ;
- en bleu clair, on a tracé des puissances intermédiaires, utilisées temporairement et qui permettront au pilote de corriger, soit sa pente, soit sa vitesse, soit les deux, tout en restant entre 1,2 VS0 (pour ne pas passer au second régime) et VFE (pour ne pas endommager les volets) ;
- en vert, on a représenté la puissance Wu maxi qui indique la possibilité de trouver une pente ascendante en cas de remise de gaz depuis la configuration atterrissage.

une courbe déduite de la polaire de l'avion (traînée, portance) : la "polaire des vitesses", dite aussi "polaire de chute", familière aux vélivoles.

On remarque, sur n'importe laquelle des courbes figure 1, que deux vitesses horizontales différentes V1 et V2 correspondent à une même valeur du vario Vz1 (V1 au premier régime et V2 au second régime). Dans tout ce qui suit, on s'intéressera au fonctionnement de l'avion au premier régime, partie à droite sur le schéma. En effet, il n'est pas question avec un avion léger d'effectuer une approche au second régime. Les avions de transport munis d'automates procèdent ainsi car une plus grande précision dans le maintien de la pente et surtout de la vitesse est assurée.

Le réglage de la puissance Wu par la commande du pilote (gaz, PA+RPM, couple…) consiste à afficher les paramètres qui doivent donner la vitesse adéquate pour tous les cas des différents régimes de vol : montée, croisière, attente, approche… Et ce sur une trajectoire dont la pente est en général imposée par la phase du vol.

Or, si le seul maintien de cette puissance Wu est bien nécessaire pour déterminer la pente (Vz/V) il en représente une condition insuffisante. En effet, après avoir affiché la puissance, le pilote devra aussi ajuster l'incidence, grâce à la gouverne de profondeur commandée par le manche afin de maintenir aussi la vitesse requise.

Par exemple, en montée on affiche les paramètres de montée et simultanément on manœuvre le manche jusqu'à ce que l'incidence soit bien celle de la vitesse Vm, recommandée pour la montée désirée (montée à pente max ou montée à Vz max ou montée normale…). L'anémomètre est finalement le contrôle du paramètre d'incidence puisqu'elle est liée à la vitesse V. Une fois la vitesse désirée (Vm) obtenue, le vario prend une valeur Vz qui est une conséquence du choix (Wu, V) mais qu'on n'a pas à piloter. On accepte alors de bonne grâce la pente Vz/V tout en vérifiant qu'elle est au moins égale à la valeur minimale requise pour franchir les obstacles.

b. Notion de régulation et d'asservissement

À ce moment le pilote ne doit pas s'endormir ! En effet, même pour un appareil stable** le maintien précis de la vitesse (à quelques kt près) doit être l'objet d'une surveillance attentive car la vitesse n'est pas asservie. C'est le pilote qui doit jouer le rôle de l'automate d'asservissement en surveillant son anémomètre et ce d'autant plus fréquemment que l'appareil est moins stable ou centré plus arrière. Chez un pilote entraîné la surveillance est un automatisme comparable à celui du maintien de trajectoire rectiligne d'une automobile. En effet, même si une voiture est très stable, il n'est pas imaginable de faire un kilomètre sur l'autoroute sans apporter de nombreuses corrections de trajectoire par le volant. Deux raisons justifient, pour l'avion comme pour la voiture, la nécessité des petites corrections :

1. l'impossibilité d'afficher la position exacte du manche ou du volant correspondant au paramètre désiré (vitesse Vm pour l'avion, position sur la chaussée pour la voiture) ;
2. des perturbations qui modifient la trajectoire de la voiture ou la vitesse de l'avion. En effet, à un instant t2, la position idéale, du manche ou du volant, n'est peut-être plus celle requise à l'instant t1 (coups de vent, turbulence…).

D'où la nécessité d'un contrôle actif pour maintenir, soit la vitesse constante dans le cas de l'avion, soit la positon de la voiture sur la chaussée. Ce contrôle correctif permanent est appelé "boucle de réaction". Un système dont la boucle est active est dit : "système bouclé". En l'absence de contrôle actif (pilote endormi ou manche bloqué !) le système est dit "ouvert" ou "en boucle ouverte" et il est susceptible de diverger. Le principe d'un système bouclé consiste en permanence à regarder la grandeur de sortie (ici la vitesse instantanée V de l'avion) et à la comparer à la valeur désirée Vm. Sachant que V instantanée sera toujours un peu différente de Vm le rôle de l'asservissement est quadruple :

1. empêcher le paramètre de sortie (ici V) de dépasser des valeurs prohibitives ;
2. empêcher au plus vite la différence entre V et Vm d'augmenter ;
3. agir afin d'annuler cette différence. Ici ramener V à une valeur de plus en plus proche de Vm (annulation de l'écart entre V et Vm) ;
4. éviter qu'un nouvel écart se produise en analysant la situation de l'instant précédent et en anticipant au plus tôt la nouvelle correction (tout un art !).

c. Cas particulier du contrôle actif en approche

Remarque concernant le signe conventionnel de la pente :

- elle augmente quand l'avion cabre (en montée pente positive) ;
- elle diminue quand l'avion pique (en descente pente négative) ;

(on oubliera *« si je pique j'augmente la pente »* ancienne convention que nous les anciens avons parfois des difficultés à abandonner…)

Dans le cas de l'approche finale une nouvelle exigence apparaît : en plus de maintenir la vitesse d'approche Vapp = 1,3 VS0 la plus constante possible, le pilote doit aussi maintenir constant un deuxième paramètre : la pente de la trajectoire (5 % en général ou parfois davantage quand des raisons liées à l'environnement et au relief l'exigent). La tâche est donc plus compliquée, d'autant que les actions de correction (profondeur et puissance) interagissent entre elles. Que l'on agisse sur le manche seul ou sur la puissance seule la conséquence immédiate est une modification à la fois de la pente et aussi de la vitesse (voir figure 2).

D'où la nécessité de techniques de pilotage parfaitement assimilées par le pilote afin de maintenir la vitesse recommandée dans le plan imposé grâce à son intervention conjuguée sur les deux commandes : la commande de puissance et la commande d'incidence (le manche).

Figure 2

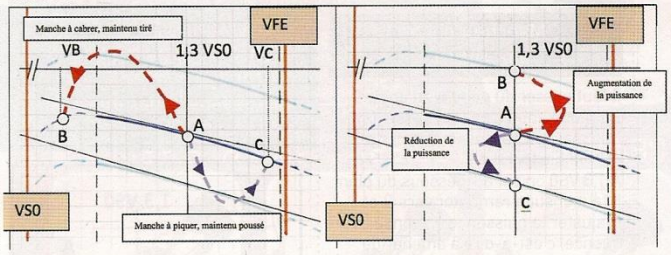


Figure 2 A
Action de la profondeur seule
L'avion est initialement au point A (pente p = - 5 %, vitesse V = 1,3 VS0)
• action au manche à cabrer (pointillés rouges). La vitesse diminue, la pente augmente. Manche maintenu à cabrer : la pente diminue et se stabilise au point B, la vitesse a diminué et reste à la valeur VB. La pente en B est un peu plus faible qu'en A. L'avion peut passer au second régime ;
• action au manche à piquer (pointillés mauves). La vitesse augmente, la pente diminue. Manche maintenu à piquer : la pente augmente et se stabilise au point C, la vitesse a augmenté et reste à la valeur VC.
• Conclusion :
- l'action au manche a modifié instantanément la pente mais l'appareil est revenu sur une pente proche de la pente initiale au point A ;
- le déplacement du manche, à cabrer ou à piquer, à la longue n'a modifié que la vitesse (pas la pente).

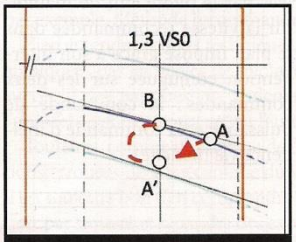
Figure 2 B
Action de la puissance seule
L'avion est initialement au point A (pente p = - 5 %, vitesse V = 1,3 VS0)
• augmentation de puissance (pointillés rouges). La vitesse augmente instantanément puis rediminue vers 1,3 VS0. La pente augmente pour se stabiliser à une valeur supérieure (au point B, pente voisine de 0 %) ;
• diminution de puissance (pointillés mauves). La vitesse diminue instantanément puis réaugmente vers 1,3 VS0 où elle se stabilise. La pente diminue pour se stabiliser à une valeur inférieure (au point C, pente voisine de -10 %).
• Conclusion :
- l'action sur la puissance a modifié instantanément la vitesse mais elle est revenue à sa valeur initiale 1,3 VS0 ;
- l'action sur la puissance, à la longue, a modifié durablement la pente (pas la vitesse).

** Appareil dont les écarts de vitesse restent raisonnables (au pire entre VS et VNE) quand on n'agit pas sur la profondeur. On distingue le comportement manche libre du comportement manche bloqué (stabilité manche libre ou stabilité manche bloqué). Un avion classique est plus stable "manche bloqué" que "manche libre".

2. Quelques exemples pratiques de méthodes de correction de la vitesse et de la pente en finale. Avec un ou deux paramètres à corriger selon les trois techniques connues :

- le manche contrôle la pente, les gaz contrôlent la vitesse ;
- le manche contrôle la vitesse, les gaz contrôlent la pente ;
- une optimisation des effets utiles des deux précédentes afin de neutraliser les effets indésirables comme les trop grands écarts de vitesse ou le creusement excessif du plan en courte finale par exemple.

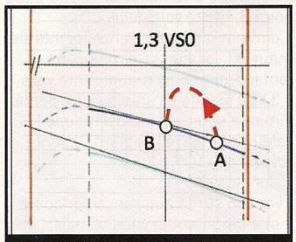
1er cas : trop rapide mais dans le plan (1 paramètre à corriger)



Manche = pente
Gaz = vitesse

Il faut passer du point A au point B. En réduisant les gaz la vitesse diminue mais on passe sur une pente plus faible (point A').
À 1,3 VS0 on est au-dessous du plan. Il faut ensuite remonter vers B et réajuster la puissance en conséquence, c'est-à-dire à afficher de nouveau la même qu'en A. On devra compenser au trim si la tendance à accélérer se reproduit.

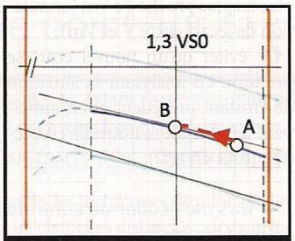
- oblige à manipuler les gaz alors que la puissance initiale était correcte ;
- produit un ralentissement immédiat.



Manche = vitesse
Gaz = pente

On ne modifie pas la puissance puisque le plan est correct. On réduit la vitesse par une action à cabrer. En maintenant la position du manche qui a permis de retrouver 1,3 VS0 on reste au point B.
Il suffit de compenser éventuellement.

- ralentissement moins efficace ;
- on corrige la vitesse sans toucher le réglage de la puissance.

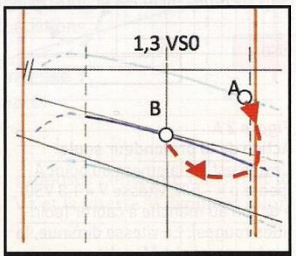


Optimisation possible

On réduit les gaz et simultanément on contrôle le plan au manche en visualisant la variation d'assiette. Quand la vitesse est correcte on réajuste la puissance.

- il faut synchroniser les deux commandes ;
- l'obtention de la vitesse correcte est rapide (chemin de A vers B plus court).

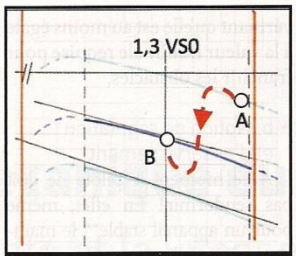
2e cas : trop rapide et au-dessus du plan, rattrapage du plan par-dessus (2 paramètres à corriger)



Manche = pente
Gaz = vitesse

Le pilote va simultanément pousser le manche pour revenir sur un plan plus bas en suivant un plan plus faible que - 5% et ensuite réduire les gaz car il va trop vite. Il devra enfin tirer le manche pour bien rester à 1,3 VS0.

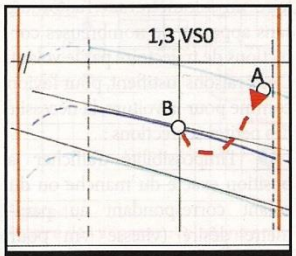
L'avion va accélérer à cause de l'action à piquer. Elle ne sera neutralisée que lorsque la réduction des gaz produira le frein aérodynamique. Entre-temps on s'est rapproché de VFE !



Manche = vitesse
Gaz = pente

Le pilote va simultanément tirer le manche pour réduire la vitesse et il va aussi réduire les gaz pour rattraper par un plan plus faible (plan plus bas). Les deux actions doivent permettre de rejoindre B et de s'y maintenir sans autre réajustement.

L'avion va d'abord passer sur un plan plus fort à cause de l'action à cabrer. Puis, se rapprochant de VS0, il va revenir par un plan plus faible vers le plan idéal dès que la réduction de puissance agira sur la pente.



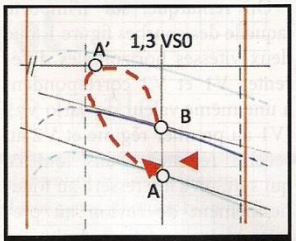
Optimisation possible

Une analyse de la situation plus experte montre qu'en réduisant seulement les gaz, la vitesse va diminuer. On va alors se rapprocher du plan idéal en maintenant un plan plus faible. Une fois la vitesse correcte atteinte, il faudra corriger au manche pour la maintenir à 1,3 VS0. La réduction des gaz est nécessaire pour rester dans le plan idéal.

La correction nécessite une bonne expérience pour doser la réduction des gaz et trouver la nouvelle position du manche liée à 1,3 VS0.

3e cas : vitesse correcte, rattrapage de plan par-dessous (1 paramètre).

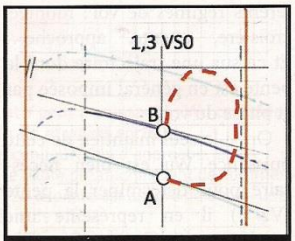
Voir **Figure 3**, extraite du *Guide de l'instructeur VFR*.



Manche = pente
Gaz = vitesse

Le pilote va initialement tirer le manche en recherchant une trajectoire voisine du palier, jusqu'au point A', ceci afin d'intercepter ensuite le plan idéal puis de le suivre. Voyant que sa vitesse diminue il devra remettre les gaz tout en maintenant le palier. Enfin il réduira la puissance en excès et reprendra la descente en B.

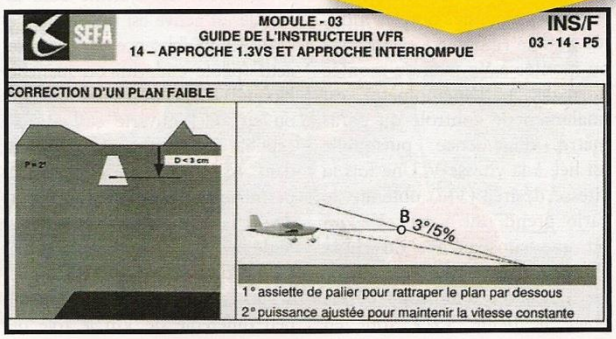
Ne pas tarder à remettre les gaz sous peine de risquer de dangereusement décélérer vers VS0.



Manche = vitesse
Gaz = pente

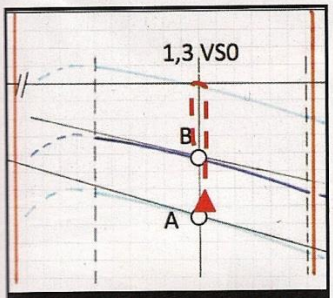
Le pilote ne va pas changer la position du manche puisque la vitesse

Figure 3
Correction de plan trop faible telle qu'enseignée en France. Description ci-contre, 3e cas, chapitre "Optimisation possible". Le plan est rattrapé au point B, celui des schémas.



est correcte. Il va augmenter la puissance ce qui va le faire accélérer puis remonter vers le palier.
Revenu dans le plan, il suffit d'ajuster la puissance pour y rester.
Le manche n'aura pas changé de position puisque la vitesse était correcte.

Doser les gaz car trop de gaz peuvent faire augmenter la vitesse vers VFE.
Solution facile mais recommandée seulement pour les petites échappées de plan car le retour vers le plan idéal est plus tardif. Si le rattrapage de plan est urgent, en très courte finale par exemple, cette méthode "gaz seuls" est à proscrire.

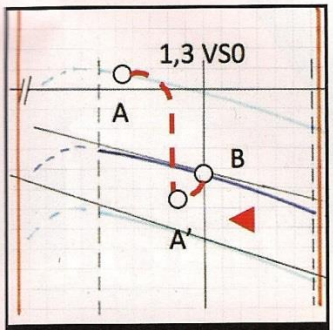


Optimisation possible

Le pilote va doser l'action à cabrer tout en ajustant les gaz pour intercepter le plan idéal sans que la vitesse change.
Il devra atteindre une trajectoire voisine du palier puis se remettre en descente dès que le plan sera retrouvé au point B.

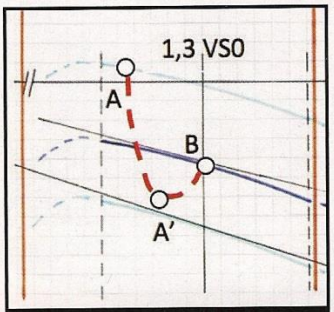
Méthode la plus efficace pour retrouver le plan sans risquer l'écart de vitesse des deux autres méthodes. Nécessite un bon entraînement.

4e cas : au-dessus du plan, et vitesse trop faible



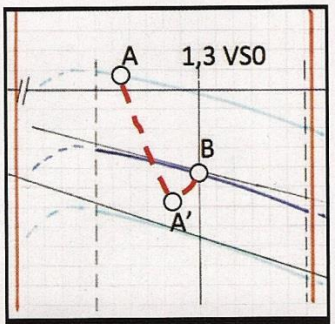
Manche = pente
Gaz = vitesse

Le pilote remet les gaz pour augmenter la vitesse mais il les réduira une fois descendu en B.
Il pousse le manche pour aller chercher le plan vers B et le gardera poussé pour maintenir la vitesse qui était trop faible en A.



Manche = vitesse
Gaz = pente

Le pilote réduit les gaz pour descendre afin d'aller chercher le plan. La puissance sera réajustée en B mais pas au niveau où elle était en A.
Il pousse le manche pour augmenter la vitesse et le garde poussé au point B car, en A, la position du manche donnait une vitesse trop faible.



Optimisation possible

L'optimisation de la situation consiste à remarquer qu'il suffit de transformer l'énergie potentielle de la trajectoire trop haute en énergie cinétique car la vitesse en A est trop faible.
Et ce sans toucher les gaz, juste en poussant le manche.
Une fois sur la bonne pente le pilote devra réduire les gaz car la puissance en A était trop grande, de même qu'il devra maintenir le manche poussé car la vitesse en A était trop faible.

Hormis l'analyse concernant l'ajustement de la puissance au début de la correction, les trois techniques sont très voisines.
Elles se terminent, après que l'avion est passé dans un plan plus faible que le plan à -5% (-8% par exemple en A'), par un réajustement de la puissance (plus réduite) avec la position du manche (plus en avant).