

## **Système de Volet Automatique – Fonctionnement**

Le chapitre précédent décrivait l'effet des volets sur une aile à profil laminaire et, en particulier, montrait que si le coefficient de portance augmente bien de manière monotone en fonction de l'angle de braquage, ce n'est pas forcément le cas de la traînée. En effet, si le braquage vers le bas des volets rétablit une incidence de la partie principale de l'aile compatible avec un écoulement laminaire étendu, la traînée globale peut diminuer malgré l'augmentation de la traînée propre des volets.

### **Automatisation des volets : Plusieurs fonctions**

Automatiser les volets ne change rien ni à la cellule ni à la motorisation, et donc n'augmente en rien les performances propres de l'avion. Par contre, en adaptant en permanence l'angle de braquage des volets en fonction des conditions de vol (en particulier du coefficient de portance requis) pour satisfaire à une fonction d'optimisation, les performances pratiques sur la totalité de la mission sont améliorées.

Comme on verra par la suite, l'automatisation des volets a aussi pour but d'augmenter la sécurité des vols en :

- Déchargeant le pilote de la gestion des volets dans les phases critiques,
- Simplifiant l'usage des volets comme générateur de traînée lors des phases d'approche,
- Améliorant la visibilité de la piste en finale,
- Limitant le risque de décrochage fortuit,
- Respectant les limites de vitesse indiquée pour le braquage des volets,
- Fournissant une alarme de l'approche du décrochage pertinente en complément de l'avertisseur de décrochage,
- Fournissant des valeurs secondaires de vitesse vraie et de vitesse indiquée, de vitesse de finesse max, etc.... pour affichage et/ou comme donnée d'entrée d'un système de pilotage automatique

Pour la plus grande partie du vol, la fonction d'optimisation la plus évidente est la minimisation de la traînée. En effet, minimiser la traînée permet, de (liste non exhaustive) :

- Augmenter la part de puissance disponible pour la montée et donc augmenter la pente de montée, le taux de montée et le plafond pratique,
- Augmenter la vitesse de croisière à puissance constante,
- Diminuer la puissance et donc la consommation de carburant à vitesse constante, ce qui réduit le coût de carburant pour une distance donnée et augmente la distance franchissable,
- Diminuer la puissance minimale d'attente et donc augmenter l'autonomie.

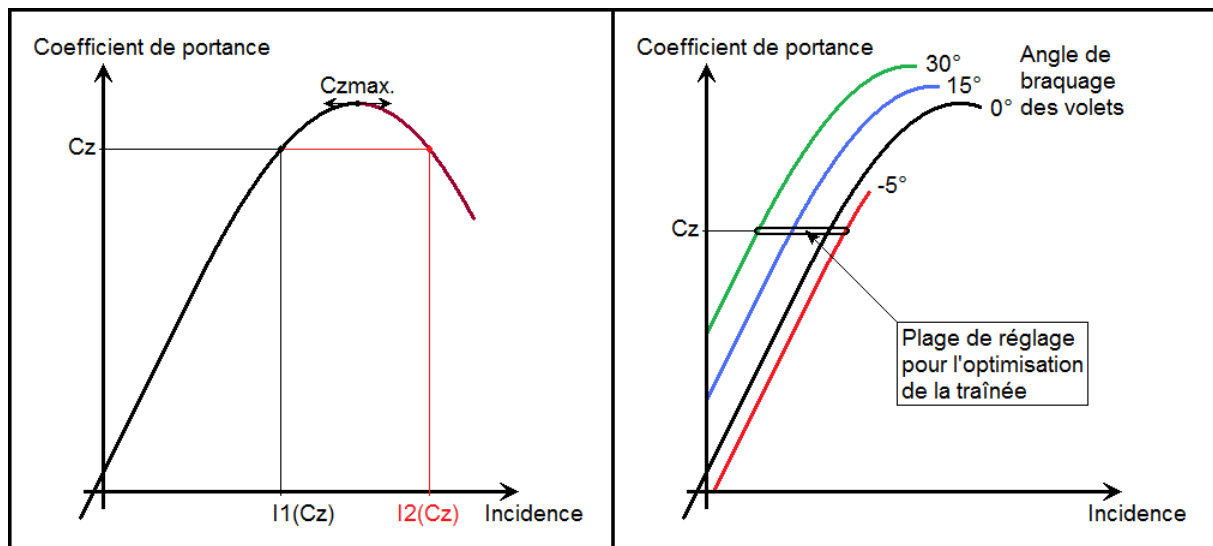
Mais il est également possible de choisir une fonction de maintien du coefficient de traînée à une valeur donnée. Dans ce cas, augmenter ou réduire la consigne de coefficient de traînée a un effet équivalent à celui de sortir ou de rentrer des aérofreins. On peut noter que réduire la consigne de coefficient de traînée au minimum (rentre les aérofreins) revient à la première fonction d'optimisation.

## Fonctionnement des volets automatiques.

Pour une aile sans volets, un coefficient de portance donné n'est obtenu (au plus) que pour deux valeurs d'incidence :

- La première valeur d'incidence, inférieure à celle du  $C_{zmax}$ , correspond à l'utilisation normale de l'avion. Autour de cette incidence le coefficient de portance varie dans le même sens que l'incidence : en vol ventre tirer sur le manche fait augmenter la portance.
- La seconde valeur d'incidence, supérieure à celle du  $C_{zmax}$ , ne correspond pas à l'utilisation normale des avions légers. Autour de cette incidence le coefficient de portance varie dans le sens opposé de l'incidence : en vol ventre tirer sur le manche fait baisser la portance, et le décrochage en découle très rapidement. Ce régime de vol très particulier n'est utilisé que pour l'approche des avions de transport en mode automatique, car cela permet de réduire légèrement la vitesse d'approche et surtout d'augmenter la traînée. Cela permet d'augmenter la pente d'approche tout en réduisant la longueur de piste nécessaire. Par contre, le contrôle de la vitesse de vol doit être extrêmement précis, ce qui est assuré par le mode automatique pour des avions dont l'inertie est suffisante.

Pour la suite, nous ne considérerons que la première valeur.



Quand l'aile est munie de volets, un coefficient de portance donné peut être obtenu sur toute une plage d'incidence, en fonction du braquage des volets.

Nous faisons régulièrement l'expérience de ce phénomène lorsque nous pilotons nos avions, sans pourtant le plus souvent en avoir conscience :

- Au début de vent-arrière, nous réduisons les gaz en palier pour casser la vitesse. Progressivement, nous tirons sur le manche pour empêcher l'avion de s'enfoncer, ce qui revient à cabrer l'avion pour augmenter l'incidence de l'aile et donc le coefficient de portance afin de compenser la diminution de la pression dynamique.
- A la vitesse adéquate, nous sortons un cran de volet, avec pour conséquence d'augmenter la courbure de l'aile et donc le coefficient de portance à incidence constante. Une fois l'avion stabilisé, à vitesse constante, l'assiette et donc l'incidence de l'aile ont diminué (action à piquer) pour compenser cette augmentation du coefficient de portance.

Cela signifie que dans les deux configurations (volets rentrés/avion cabré et volets sortis/avion moins cabré), la portance compense le poids de l'avion pour la même vitesse indiquée, c'est-à-dire que nous avons le même coefficient de portance. Ce coefficient de portance pourrait également être obtenu pour toutes les valeurs de braquage des volets intermédiaires, ce qui impliquerait une assiette correspondante pour chaque valeur de l'angle de braquage des volets. Il y a donc une infinité de solutions.

*Automatiser les volets consiste à laisser un automatisme choisir, parmi l'infinité de solutions possibles, celle qui correspond à l'optimum de la fonction requise, (traînée minimale ou coefficient de traînée fixé.)*

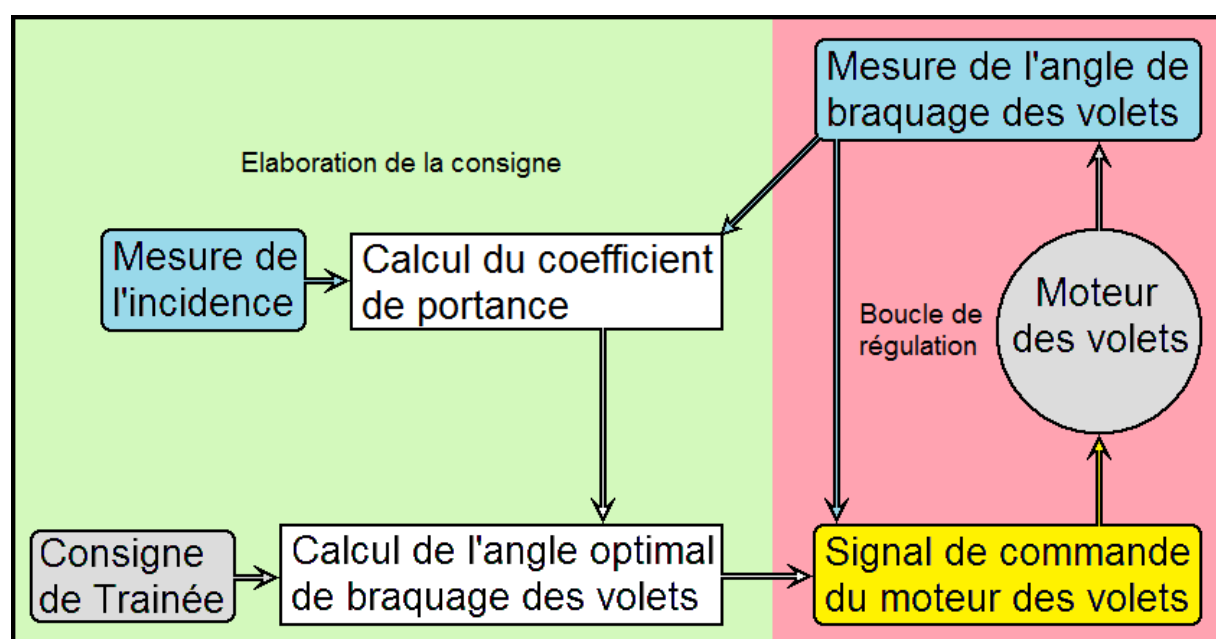
Pour fonctionner l'automatisme a besoin de mesurer deux variables : L'incidence de l'aile et l'angle de braquage des volets. En fait, nous verrons plus loin qu'il a également besoin d'une mesure de la vitesse indiquée (IAS).

L'incidence de l'aile doit être mesurée à l'aide d'un capteur spécifique qui fera l'objet du troisième chapitre de cette série (VA-3\_Capteur d'incidence). Pour l'instant, supposons que nous disposons d'un capteur qui nous donne une mesure suffisamment précise et fiable de l'incidence de l'aile, c'est-à-dire de l'angle entre le vent relatif et la corde du profil référencé à l'angle de braquage nul des volets.

L'angle de braquage des volets est beaucoup plus facile à mesurer avec un capteur industriel, (un LVDT, un résolveur ou un codeur optique rotatif sont préférables à un potentiomètre dont l'usure finit par fausser la mesure).

La séquence de fonctionnement de l'automatisme est la suivante :

- En fonction de l'incidence et de l'angle de braquage des volets, l'automatisme calcule le coefficient de portance de l'aile.
- Ensuite, en fonction du coefficient de portance de l'aile et de la consigne de coefficient de traînée, l'automatisme calcule la consigne d'angle optimal de braquage des volets.
- Si la consigne d'angle de braquage des volets est différente de l'angle de braquage des volets mesuré, un ordre de mouvement (impulsion), dans un sens ou dans un autre, est donné au moteur électrique des volets.



VA-2\_Système de volet automatique

Le cœur de l'automatisme est un microcontrôleur suffisamment puissant pour que le temps de cycle de calcul reste suffisamment court par rapport aux constantes de temps de la mécanique du vol. La durée de l'impulsion envoyée au moteur électrique des volets est choisie très légèrement supérieure au temps de cycle de calcul afin que tant que la consigne n'est pas atteinte, le moteur électrique des volets soit alimenté sans interruption. Par contre, dès que le braquage des volets atteint la valeur de consigne, cette alimentation cesse. Une hystérésis est introduite au niveau de la consigne d'angle de braquage pour éviter une succession rapide d'impulsions de sens opposés qui n'aurait aucun effet utile, mais qui ferait augmenter la consommation électrique et chauffer le moteur électrique des volets.

Le coefficient de portance de l'aile est calculé par interpolation entre des valeurs tabulées dans une table à deux entrées (incidence / angle de braquage). Cette méthode nécessite une mémoire assez importante, mais est à la fois rapide et souple dans la mesure où il suffit de changer la table de valeurs pour adapter le système à un avion différent.

La consigne d'angle de braquage des volets est également calculée par interpolation entre des valeurs tabulées dans une table à deux entrées (coefficient de portance / coefficient de traînée).

La commande du moteur électrique des volets dépend directement de la différence entre la valeur optimale calculée et la valeur mesurée de l'angle de braquage des volets. On retrouve ici une régulation en boucle fermée classique (sur fond rose), la partie précédente du calcul constituant l'élaboration de la consigne (sur fond vert).

Le braquage des volets n'est pas sans effet sur les efforts sur la commande de tangage. Comme cela est déjà réalisé sur certains avions comme le Super Diamant, les volets sont mécaniquement reliés à un tab sur la profondeur, afin que les manœuvres des volets ne se traduisent pas par des efforts au manche. Un second tab fixé de l'autre côté de la gouverne de profondeur est directement commandé par le pilote pour un ajustage fin. L'inconvénient de ce système est que les efforts antagonistes des deux Tabs à l'équilibre induisent des contraintes dans la gouverne et une traînée inutile. Il serait plus efficace que les deux Tabs soient commandés également par un mélangeur mécanique. Ce système mécanique pourrait être utilisé avec des volets automatiques. Une autre solution utilisant une servocommande électrique commandée à la fois par l'automate des volets et par les boutons de compensateur du pilote serait certainement plus légère et plus efficace.

### **Prise en compte des limitations**

Le fonctionnement décrit ci-dessus est très simplifié. Il ne prend pas en compte la plage de vitesses en dehors de laquelle l'usage des volets est interdit. La limitation de vitesse de braquage des volets a pour but d'éviter des efforts structuraux trop importants à la cellule. Les coefficients de portance et de traînée propres des volets et donc les forces et les moments qu'ils génèrent sur la cellule et en particulier la partie principale de l'aile dépendent de leur angle de braquage et bien entendu de la vitesse indiquée.

Pour prendre en compte ces limitations, l'automatisme a impérativement besoin d'une mesure de la vitesse indiquée. Nous verrons au troisième chapitre de cette série (VA-3\_Capteur d'incidence), que le capteur d'incidence fournit également la valeur de la vitesse indiquée.

La solution la plus simple de prise en compte des limitations d'action sur les volets consiste à vérifier que la vitesse indiquée (IAS) est inférieure ou égale à la valeur limite d'usage des volets définie dans le manuel de vol.

- Si IAS est inférieure à la valeur limite autorisée par le manuel de vol, la « consigne limitée » est égale à l'angle de braquage optimal défini précédemment.

- Si par contre IAS est supérieure à la valeur limite autorisée par le manuel de vol, la « consigne limitée » est égale à zéro (volets rentrés).

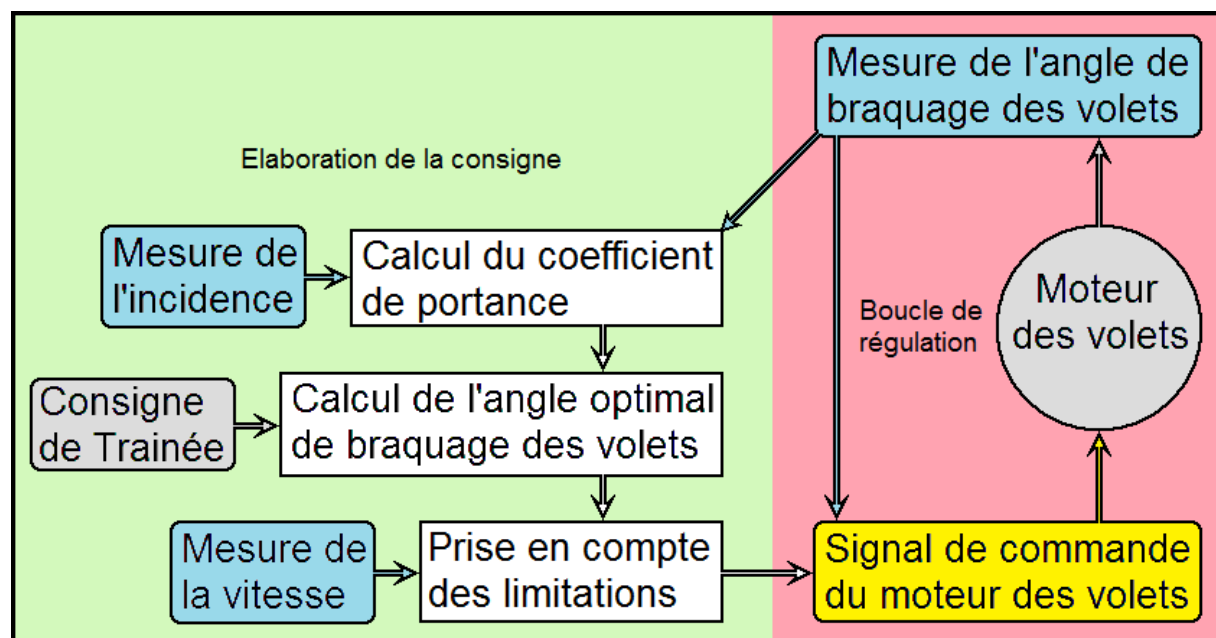
On peut noter que si le mode automatique était enclenché avec les volets sortis à une vitesse excessive, l'automatisme protégerait la cellule dès sa mise en service.

Le but de la limitation d'usage des volets est d'éviter des efforts structuraux trop importants à la cellule. Comme ces efforts dépendent à la fois de l'angle de braquage des volets et de la vitesse indiquée, la vitesse limite devrait dépendre de l'angle de braquage des volets.

Dans certains manuels de vols, on trouve des valeurs différentes de vitesses indiquées limites pour différentes configurations, par exemple : premier cran (12,5°) - 100 kts ; second cran (25°) - 90 kts ; troisième cran (40°) – 80 kts. Mais en général, on ne trouve qu'une seule valeur de vitesse indiquée limite d'usage des volets, à la fois pour simplifier les consignes données au pilote et éviter certaines fausses manœuvres...

Or ce qui est difficilement gérable pour un pilote humain qui a bien d'autres tâches à effectuer ne pose aucun problème à un automate dédié. Pour un nouvel avion de construction amateur, l'angle limite de braquage des volets doit être une fonction monotone de la vitesse indiquée. Une version améliorée de l'automatisme calcule donc à chaque boucle de calcul l'angle de braquage limite des volets pour la comparer à l'angle de braquage optimal défini précédemment.

- Si l'angle de braquage optimal est inférieur à l'angle limite calculé en fonction d'IAS, la « consigne limitée » est égale à l'angle de braquage optimal défini précédemment.
- Si par contre l'angle de braquage optimal est supérieur à l'angle limite calculé en fonction d'IAS, la « consigne limitée » est égale à l'angle limite calculé en fonction d'IAS.



En complément, l'automate fournit en permanence une indication de la vitesse indiquée (IAS) et/ou de l'incidence. Il fournit également une alarme en cas de contraintes excessives sur la structure (Coefficient de portance) x (IAS)<sup>2</sup> supérieur à un seuil de sécurité. Contrairement à un accéléromètre qui ne prend pas en compte la masse de l'appareil, ce paramètre est réellement représentatif des forces et moments appliqués à la cellule.

## **Commande de la trainée – Fonction aérofrein**

Dans les paragraphes précédents, la « consigne de trainée » est une donnée d'entrée de l'automatisme. En fait, cette variable est l'image de la position d'une commande à la disposition du pilote.

Afin de garder une perception familière, cette commande pourrait prendre la forme d'une poignée en translation horizontale le long de la paroi gauche du cockpit, avec un cran de verrouillage à ressort dans la position la plus avant correspondant à la valeur « Trainée minimale », la consigne de coefficient de trainée augmentant progressivement en tirant la poignée vers l'arrière.

Ceci reproduit la commande d'aérofrein classique sur les planeurs et sur les quelques avions qui en sont équipés.

Avec la poignée en position « aérofreins rentrés », c'est-à-dire « Trainée minimale », l'automate commande la position des volets pour minimiser la trainée fonction du coefficient de portance requis.

Pour des positions correspondant des « aérofreins de plus en plus largement sortis », c'est-à-dire « Coefficients de Trainée de plus en plus importants », l'automate commande la position des volets pour atteindre le coefficient de trainée sélectionné au coefficient de portance requis. Il est à noter qu'aux faibles vitesses, impliquant des braquages relativement importants des volets pour maintenir le coefficient de portance requis, le coefficient de trainée soit supérieur ou égal à celui sélectionné au niveau de la poignée de commande. Une alarme sous forme d'un voyant clignotant alerte le pilote.

## **Exemple d'usage des volets automatiques**

Comment l'automate réagit-il en fonction dans différentes phases de vol ?

### 1/ Décollage.

Bien entendu, dans la phase de décollage, la consigne de trainée doit être la plus faible possible, ce qui correspond à la position de la commande « Aérofreins rentrés ».

Avec un avion à train tricycle, le roulage se fait avec une assiette neutre qui correspond à une incidence faible. En mode automatique, l'automate calcule un coefficient de portance faible. Ce coefficient faible est naturellement atteint avec les volets rentrés. L'accélération se fait donc sans trainée supplémentaire. A la vitesse de rotation, la traction sur le manche se traduit par une augmentation de l'incidence. L'automate calcule un coefficient de portance plus élevé qui correspond à des volets sortis environ au « premier cran ». Dès que le coefficient de portance est suffisant après la rotation, l'avion quitte le sol et l'incidence mesurée est bien significative de la portance réelle. L'automate sélectionne donc un angle de braquage des volets qui minimise la trainée pendant toute la phase d'accélération près du sol, de la montée initiale (pente maximale) et de la montée (taux de montée maximal).

Avec un avion à train classique l'assiette au début de roulage est très cabrée et l'automate sort rapidement les volets à un angle correspondant environ au « premier cran ». Mais dès que l'avion est mis en « ligne de vol » l'incidence mesurée devient aussi faible que celle d'un avion à train tricycle, et l'automate se comporte exactement comme avec ce dernier.

### 2/ Mise en palier - Croisière

En réduisant le taux de montée, l'avion accélère naturellement et l'incidence diminue. L'automate rentre progressivement les volets en fonction de l'incidence mesurée. Pour certains avions et la plupart des planeurs à VA-2\_Système de volet automatique

profils laminaires pour lesquels cette fonction est possible, l'automate dépasse la position « Volets à Zéro » pour les braquer en négatif et minimiser ainsi la traînée...

Cette minimisation de traînée est à la fois transparente pour le pilote qui peut ajuster la puissance pour obtenir la vitesse voulue, et source de réduction de la consommation de carburant.

### 3/ Descente

Comme pour la croisière, la minimisation de la traînée est source de réduction de la consommation de carburant sans que cela ne change quoi que ce soit au pilotage de l'avion d'autre qu'une la puissance affichée un peu plus faible. Il pourra être nécessaire d'équiper l'avion de volets de capot pour éviter de refroidir le moteur.

Pour obtenir une pente de descente plus raide que celle obtenue en réduisant les gaz, il est nécessaire de braquer les volets non plus pour réduire la traînée mais au contraire pour l'augmenter. Une action sur la commande de traînée se traduit par un braquage des volets vers le bas que si la vitesse indiquée le permet. Si ce n'est pas le cas, un voyant clignotant informe le pilote qu'il doit d'abord ralentir en cabrant l'avion pour que l'automate braque les volets à l'angle qui produise le coefficient de traînée recherché. L'automate protège l'intégrité de la cellule. Pour braquer volontairement les volets en survitesse, le pilote doit repasser en commande manuelle des volets.

L'augmentation de l'angle de braquage des volets au delà de celui qui correspond à la traînée minimale se traduit bien entendu par une augmentation de la traînée mais aussi par une assiette plus « à piquer » qui favorise la vision vers l'avant.

On peut noter que la commande de traînée agit comme celle d'un aérofrein. Une position de la commande correspond à un coefficient de traînée donné et non à une force de freinage constante en fonction de la vitesse. Cela que le freinage est d'autant plus important que, dans la plage autorisée, la vitesse est élevée. Cela évite notamment de faire augmenter automatiquement les coefficients de traînée freinage lorsque la vitesse diminue.

### 4/ Approche.

En approche, la commande de traînée à travers l'automate est beaucoup plus sécurisante que la commande directe des volets. En effet le pilote peut non seulement augmenter à volonté la traînée jusqu'à la limite admissible par la structure sans se soucier de celle-ci, mais la réduire jusqu'à la valeur minimale sans risquer de « trop rentrer les volets », ce qui se traduit par une augmentation potentiellement dangereuse de l'incidence de l'aile.

En cas de remise de gaz en particulier, cette fonction qui permet de « rentrer les aérofreins » et de profiter de la réduction de la traînée sans risquer de se retrouver aux grands angles est très intéressante.

Le dépassement de l'axe de piste en dernier virage se traduit rapidement par une inclinaison excessive et donc un facteur de charge excessif compte tenu de la vitesse d'approche. Avec des volets en commande manuelle, cela peut se traduire soit par un décrochage subit à basse altitude, soit plus rarement par une perte importante d'altitude avec augmentation de la vitesse (départ en virage engagé). Avec les volets automatiques, l'augmentation du facteur de charge se traduit par une recherche d'un coefficient de portance supérieur par l'augmentation de l'angle de braquage des volets. Le coefficient de traînée peut dépasser celui requis par la commande de traînée mais cela éloigne le risque immédiat de décrochage et le pilote alerté par une alarme a plus de chance de réagir dans le bon sens (rendre la main, remettre des gaz, et si nécessaire interrompre l'approche).

### **Fonction complémentaire : « Régulation de vitesse d'approche »**

Dans le mode « Régulation de Trainée », l'automate des volets gère la traînée en fonction des besoins spécifiés par le pilote. Mais en approche, il peut être intéressant d'utiliser l'automate pour conserver la vitesse d'approche.

Dans le mode « Régulation de vitesse d'approche », l'automate des volets gère la traînée non plus en fonction des besoins spécifiés par le pilote, mais pour conserver la vitesse en approche. Si la vitesse mesurée diminue en dessous de la vitesse d'approche, l'automate réduit la consigne de traînée et si au contraire la vitesse mesurée augmente au dessus de la vitesse d'approche, l'automate augmente la consigne de traînée.

Dans ce mode avec une puissance moteur pré affichée compatible avec la pente recherchée, le pilote en finale vise le point d'aboutissement et l'automate conserve la vitesse d'approche. Si la puissance du moteur est trop faible ou trop forte, le régulateur fournit une alarme correspondante au pilote.

### **Régulation de vitesse d'approche incluant la commande des gaz**

On voit qu'en motorisant la manette des gaz, ou en agissant sur la commande numérique du FADEC dans le cas d'un système mono-manette, nous obtenons une véritable fonction « auto-manette » en mode vitesse où le système contrôle la puissance de manière à obtenir la vitesse désirée tout en restant dans les marges opérationnelles.

Dans le cas du dépassement de l'axe de piste en dernier virage évoqué ci-dessus, l'automate gèrerait à la fois les volets et les gaz pour maintenir l'avion à une incidence de sécurité, quitte à augmenter temporairement la vitesse de vol dans le virage à grande inclinaison.