

1 – Objet

Cette note décrit les notions principales relatives à l'anémométrie. Elle s'intéresse plus particulièrement à l'anémométrie rencontrée sur les avions légers (certifiés en FAR ou JAR 23, JAR 22 et JAR-VLA...), sans traiter les effets liés au Mach.

2 – Définitions

- V indiquée (Vi) : c'est la vitesse lue par le pilote sur l'anémomètre. En appellation anglo-saxonne, **IAS** pour Indicated Airspeed.
- Vind.corrigée (Vic) : c'est la vitesse indiquée corrigée de l'erreur instrumentale liée à l'anémomètre.
- V conventionnelle (Vc) : c'est la vitesse indiquée corrigée des erreurs liées à l'installation anémométrique (erreur de statique et de totale) ; ce serait la vitesse indiquée par un anémomètre parfait, branché sur une installation avion parfaite de telle sorte que la valeur indiquée en atmosphère standard, au niveau de la mer, serait la vitesse propre (Vp voir ci-dessous).
L'appellation anglo-saxonne est la **CAS** pour Calibrated Airspeed.

Les lois d'étalonnage, établissant la correspondance entre la vitesse et les pressions Pstatique et Ptotale sont de deux ordres suivant que l'on est en subsonique ou en supersonique :

En subsonique (jusqu'à 661 kt, ou 340 m/s ou Mach 1), la vitesse est donnée par la relation de St Venant. Cette relation s'approxime bien jusqu'à 250 kt par la relation de Bernouilli.

En supersonique (au-delà de 661 kt), la vitesse est donnée par la relation de Rayleigh.

- V équivalente (VE) : L'équivalent vitesse ou **EAS** pour Equivalent Airspeed est une vitesse intermédiaire de calcul qui considère que la masse volumique de l'air, à l'altitude considérée, est $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$.

Les anémomètres rencontrés sur les avions légers sont étalonnés en EV, c'est à dire que la valeur lue par le pilote est un équivalent de vitesse.

Par définition, on a : $\rho \cdot V_p^2 = \rho_0 \cdot V_e^2$

La VE se déduit également de la Vc par une correction liée à la pression, notée Kp, fonction de la vitesse et de l'altitude pression considérée.

Table des Kp

50 000 ft	.90	.87	.86	.86	.84	.84
40 000 ft	.94	.92	.90	.90	.87	.87
30 000 ft	.96	.95	.94	.94	.91	.90
20 000 ft	.98	.97	.97	.96	.95	.94
10 000 ft	1	.99	.99	.98	.98	.97
0 ft	1	1	1	1	1	1
Vc (kt)	250	300	350	400	450	500

On a : $V_e = V_c \cdot k_p$

- V propre (Vp) : C'est la vitesse de l'avion par rapport à la masse d'air, projetée sur l'horizontale locale . Sauf dans des cas particuliers, les performances des avions légitiment le fait de considérer que la Vp est peu différente de la vitesse de l'avion sur trajectoire. En notation anglo-saxonne, c'est la true Airspeed (**TAS**).

La Vp se déduit de la Ve par la correction de masse volumique, soit : $\sigma = \rho/\rho_0$
avec ρ masse volumique à l'altitude pression Zp
et ρ_0 masse volumique au niveau de la mer en atmosphère standard, soit 1.225 kg/m3.

Au final, on a donc : $V_p = V_e / \sqrt{\sigma}$

APPLICATION NUMÉRIQUE:

Soit un PILATUS PC 12, croisant au niveau 100 (10 000ft/Std), à la vitesse indiquée de 250 kt, avec une température extérieure de -10 °C (atmosphère Std). Quelle est la vitesse propre de cet avion , sachant que l'anémomètre et le circuit de statique sont entachés des erreurs suivantes :

- erreur de l'anémomètre à 250 kt : +2 kt
- erreur liée à la statique à 250 kt, en lisse : -5 kt

On a Vi = 250 kt

La Vic = Vi+ΔV, avec ΔV= +2kt, soit Vic=250+2=252 kt

La Vc se déduit de la Vic par une relation analogue : Vc = Vic+ΔVstat, avec ΔVstat = -5kt, soit Vc=252-5=247 kt

On a ensuite VE = Vc*kp avec kp =1 (cf tableau ci-dessus). Ceci légitime le fait que pour des avions dont la vitesse n'est pas supérieure à 250 kt, on fait l'amalgame entre VE et Vc. Ce n'est pas rigoureux, mais c'est la pratique !

Au niveau 100 avec une température Std de -10 °C, on obtient $\sigma=0.7385$

D'où on tire une Vitesse propre $V_p=247/\sqrt{\sigma}= 287$ kt.

3 – Les erreurs liées à l'anémométrie

Comme tout instrument mécanique, l'anémomètre présente des erreurs liées aux frottements résiduels des pièces mobiles, aux caractéristiques de fabrication de la capsule sensible, dite capsule de Vidi, etc.

Les anémomètres répondent aux exigences de TSO parmi lesquels on citera le TSO C2b et le TSO C46 pour les anémomètres plus performants. Les erreurs dues à la qualité de fabrication sont bornées afin de proposer des instruments de mesure fiables et répétitifs.

Il n'y a pas de tolérance à la fois standard et simple à retenir ; elle est liée à chaque fois au type de l'anémomètre, défini comme suit :

Type I : une révolution (de l'aiguille)

Type II : une révolution avec une échelle dilatée sur certaines plages de vitesses.

Type III : une révolution de 1 tour et demi à 1 tour ¾.

Type IV : xx révolution

type V : 1 tour ¾ à 2 révolutions.

C'est l'ensemble de ces erreurs qui sont clairement identifiées lors des étalonnage menés sur l'instrumentation des avions prototypes, utilisés dans le cadre des démonstrations de conformité. Lors d'une campagne d'essais en vol, on étalonne l'anémomètre au début et à la fin de la période d'essais, afin de vérifier que l'instrument n'a pas dérivé avec le temps. Si les essais s'éternisent, on peut être amené à vérifier l'anémomètre après environ 6 mois.

Cette remarque anodine décrivant le bon usage des étalonnages et vérifications pendant les essais en vol est trop souvent ignorée et on a déjà vu des résultats d'essais remis en cause par un étalonnage absent ou douteux ou « bricolé » ou les deux à la fois.

Ce point est fondamental pour les vérifications des performances telles que la mesure des vitesses de décrochage.

ILLUSTRATION D'ANÉMOMETRES TIPIQUES DE L'AVIATION GÉNÉRALE

L'anémomètre du bas est dit Anémomètre vitesse vraie (Vp) car il permet de réaliser la correction de masse volumique (passage de VE à Vp), en affichant la température régnant à l'altitude de vol en face du niveau de vol grâce à une molette. L'aiguille de l'anémomètre indiquera alors sur la couronne blanche la Vp (ceci ne serait vrai que pour un instrument et une installation anémométrique parfaite).



4 – Les erreurs liées à l'installation anémométrique

L'installation anémométrique comprend généralement :

- un anémomètre, un variomètre et un altimètre.
- une ou deux prises de pression statique, situées de façon pariétale sur le fuselage.
- une prise de pression totale, située sous la voilure, appelée prise Pitot ou tube Pitot.
- les canalisations acheminant les informations de pression des prises aux instruments.

NOTA :

Sur des avions plus sophistiqués, ces informations de pression et de température statique sont acheminées vers une (ou deux) ADC (Air Data Computer) capable de traiter ces mesures, en les corrigeant, afin de fournir au pilote les différentes informations de vitesse requises.

On peut également trouver un incidencemètre dont l'information servira, entre autres, à l'exploitation des tables de correction.

Il existe des erreurs liées aux prises de pression implantées sur le fuselage et sous la voilure ainsi qu'à la qualité de l'écoulement aérodynamique local autour de ces prises. En deux mots, l'avion en vol, se drape d'une couche limite dont les caractéristiques pseudo-stationnaires sont étroitement liées à la configuration de l'avion et à sa vitesse. Cette couche limite est animée d'une pulsation périodique pour les avions monomoteurs due au brassage de l'air par l'hélice.

Les erreurs liées à la prise de pression totale sont généralement négligeables devant les erreurs des prises statiques, c'est pourquoi on parle toujours des Erreurs de Statique (position error en anglais).

Ces erreurs sont quantifiées dès le début de l'évaluation d'un prototype afin de vérifier si elles restent compatibles avec les exigences réglementaires applicables. Dans les faits, les seules réglages possibles pour atténuer ces erreurs consistent à déplacer les prises statiques dans des zones réputées moins perturbées. Il n'existe pas de remède miracle à une mauvaise statique ; on fait avec tant que les résultats restent acceptables.

Les règlements fournissent les erreurs maximales admissibles entre V_{ic} et V_c aux paragraphes 23.1323 et 23.1325.

Les exigences sont les suivantes :

L'erreur de statique doit rester inférieure au **Sup[3% de la V_c ou 5 kts]**

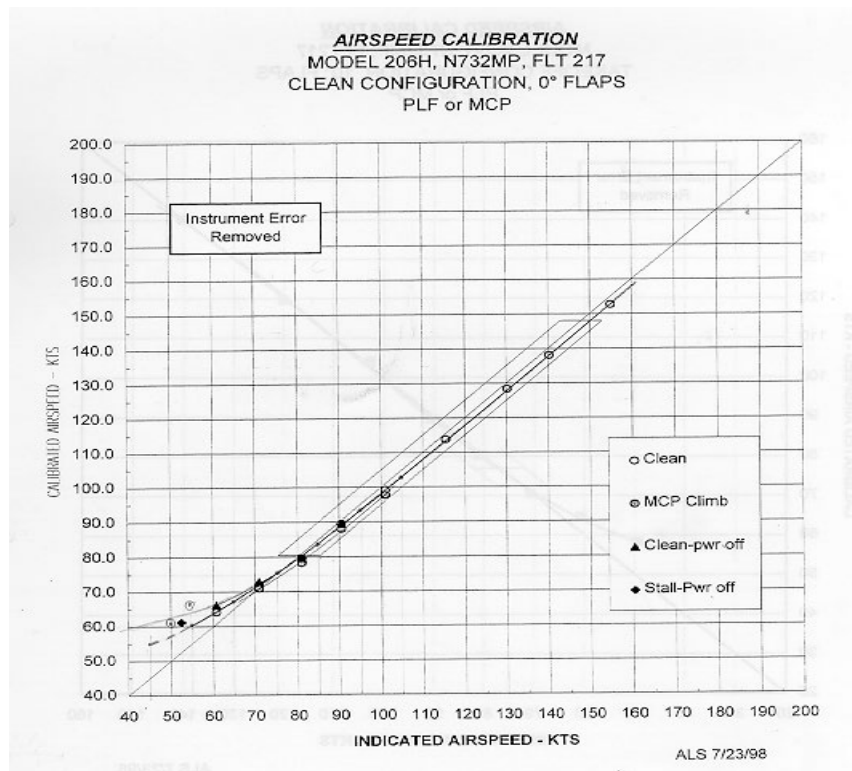
dans les deux cas suivants :

- 1.3 V_{s1} à $V_{MO/MMO}$ ou V_{NE} , en LISSE.
- 1.3 V_{s1} à V_{FE} avec les volets sortis (configuration décollage ou atterrissage)

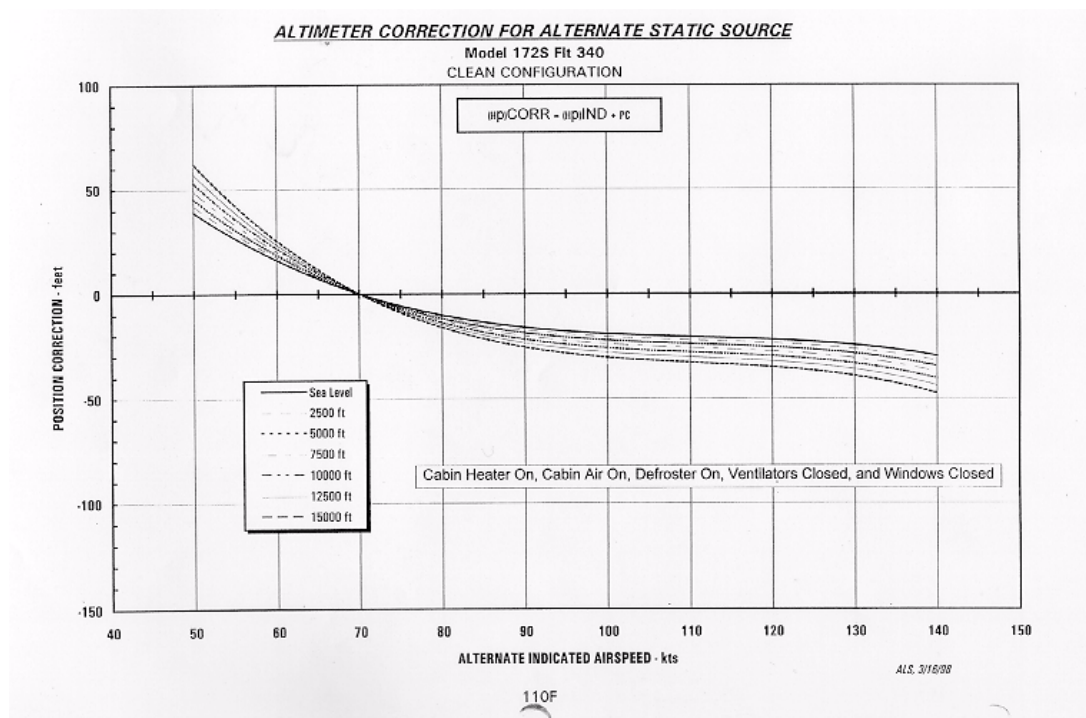
On trouve également dans ces paragraphes tout un ensemble d'exigences couvrant les aspects liés à la protection des prises statiques contre le givrage, la rétention d'humidité et encore bien d'autres.

Ces notions sont illustrées à la page suivante.

Etalonnage de statique Cessna 206H



Correction Altimétrique liée à l'utilisation de la statique secours



Pour mémoire, les méthodes d'essais en vol permettant d'établir ces courbes peuvent être :

- Etalonnage sur bases
- Etalonnage par passage à la tour
- Etalonnage par accompagnement

5 – Les modifications affectant les étalonnages de statiques

Compte tenu de la sensibilité des phénomènes mis en jeu, on comprend aisément que toute modification de forme (c'est à dire affectant la cellule), ou des prises de pression affectent potentiellement les étalonnages de statiques.

Il en va de même pour les configurations d'avions :

- modification du braquage des volets
- emport de pods
- montage de cargo pack sous le fuselage
- implantation d'antennes volumineuses dans des zones affectant les prises de pression
- changements notables des caractéristiques du souffle de l'hélice (modification de la puissance moteur, des caractéristiques de l'hélice).
- givrage d'éléments pouvant perturber les écoulements locaux autour des prises de pression statiques.

Pour vérifier que la modification n'affecte pas les statiques, le constructeur pourra établir une vérification allégée, portant sur certains points de mesure, par la méthode d'accompagnement.

Les modifications aérodynamiques, telles que les kits de vortex turbulator destinés à recoller la couche limite sur la voilure aux grandes incidences, proposent parfois de générer des marges en termes de V_{S0} . Si le postulant veut bénéficier d'un abaissement de la V_{S0} (généralement de l'ordre de 5 kt) il est impératif de vérifier l'étalonnage anémométrique aux basses vitesses.