

Jaugeurs de carburant pour avions légers

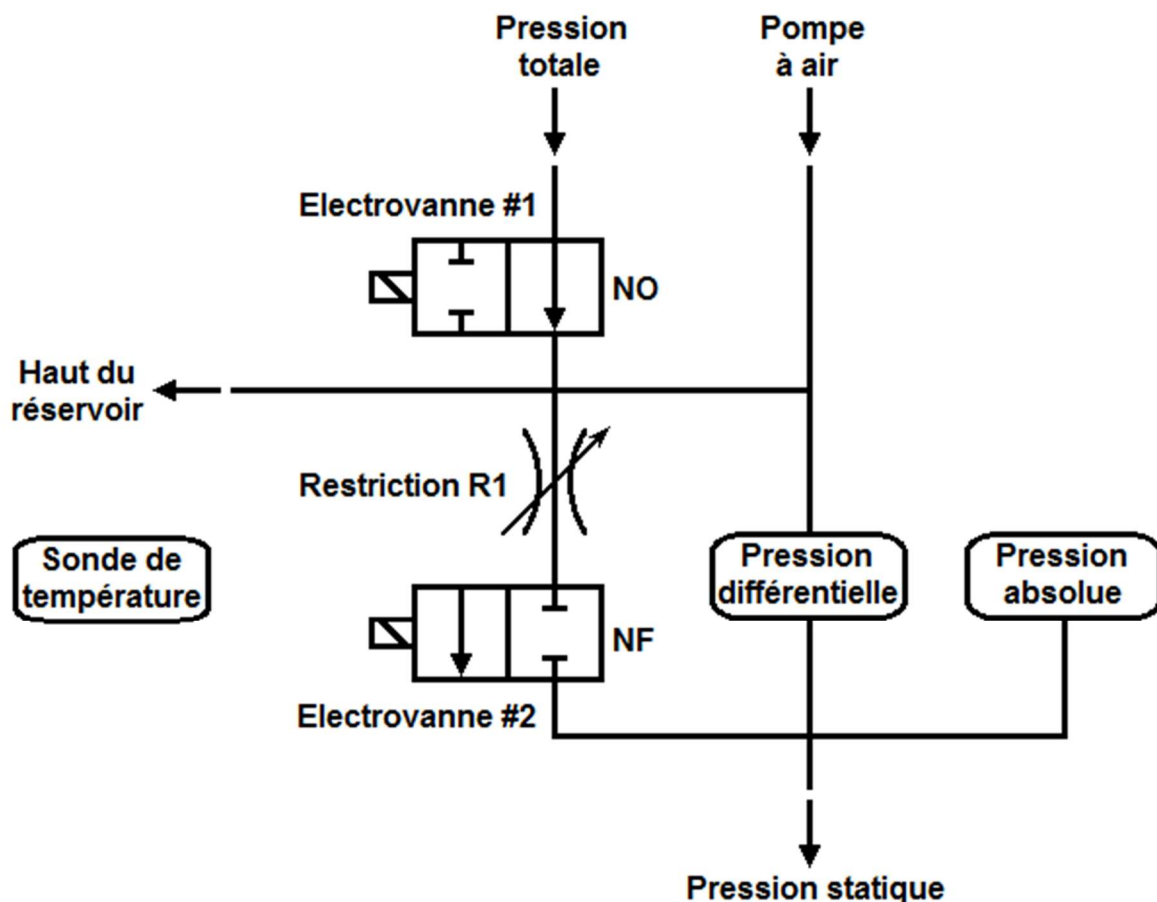
Troisième chapitre (JA3)

Le chapitre précédant (JA2) présente un système de jaugeur de carburant pour avions légers basés sur une mesure du temps de dégonflage d'un réservoir qui, **toutes choses égales par ailleurs**, est proportionnel au volume de gaz dans le réservoir.

Cependant, dans un avion en vol, l'expression « toutes choses égales par ailleurs » a peu de chance d'être vérifiée. En effet, en fonction de la température et de la pression atmosphérique du lieu et surtout de l'altitude, la densité de l'air varie. Or si le temps de dégonflage est bien proportionnel au volume de gaz présent dans le réservoir, il est également proportionnel à la racine carrée de la densité de l'air présent dans le réservoir. Pour que le système de jaugeur fonctionne avec une précision suffisante, il faut prendre en compte la densité de l'air, et donc mesurer ses deux principaux facteurs, la pression statique et la température du gaz dans le réservoir.

Ceci entraîne une modification du module de mesure présenté au chapitre précédent (JA2).

SCHEMA DU MODULE DE MESURE VERSION 2



Mesurer la pression statique à l'aide d'un capteur de pression absolue ne pose pas de problème.

La mesure de la pression statique au début et la fin du dégonflage est une méthode au moins aussi précise que l'intégration analogique de la mesure du capteur de pression différentielle par la bouteille « Thermos ».

Mesurer la température du gaz dans le réservoir à l'aide d'une sonde de type PT100 ne pose pas de problème non plus. La sonde de température peut être placée en différents endroits :

- La meilleure solution est de la fixer isolée de la paroi du réservoir, dans la partie la plus haute de ce dernier.
- On peut aussi la fixer au contact de la tuyauterie reliant le réservoir au module de mesure. Dans ce cas, utiliser une tuyauterie en aluminium qui est un bon conducteur de la chaleur avec une chaleur volumique faible. Pour que la mesure soit le moins possible biaisée par la température de l'air de gonflage qui peut être différente, il faut la prendre à la fin de la séquence de dégonflage.

FONCTIONNEMENT DU MODULE DE MESURE VERSION 2

1 - Au repos,

L'électrovanne #1 est ouverte et l'électrovanne #2 est fermée. Le haut du réservoir est donc connecté à la prise de pression totale par le module de mesure qui joue le rôle de mise à l'air libre.

Le capteur de pression différentielle indique la surpression dans le réservoir qui suit, avec un certain retard, la pression dynamique.

Si elle est placée dans la partie la plus haute du réservoir, la sonde de température mesure la température du gaz présent dans le réservoir.

Le capteur de pression absolue indique la pression statique.

2 - Gonflage du réservoir.

L'électrovanne #1 est alimentée. Elle est fermée.

La pompe à air est alimentée.

La surpression croissante dans le réservoir est mesurée par le capteur de pression différentielle.

Quand cette surpression atteint la valeur de consigne haute prédéterminée (**Dph** - par exemple 5 kPa) la pompe à air n'est plus alimentée. Le réservoir est gonflé.

3 - Dégonflage du réservoir

L'électrovanne #1 est toujours alimentée et donc fermée.

Simultanément :

- L'électrovanne #2 est alimentée. Elle est ouverte.
- La pression statique du début du dégonflage (**Psd**) est enregistrée.

- Un chronomètre est démarré.

Le réservoir se dégonfle à travers la restriction réglable R1

La surpression décroissante dans le réservoir est mesurée par le capteur de pression différentielle. Quand cette surpression atteint la valeur de consigne basse prédéterminée (**Dpb** - par exemple 1 kPa) :

- Les électrovannes ne sont plus alimentées. #1 est ouverte et #2 fermée.
- La pression statique de fin du dégonflage (**Psf**) est enregistrée.
- Le chronomètre est arrêté.

Le réservoir est dégonflé, et se retrouve dans la phase (1 – Repos).

4 – Correction de la vitesse verticale et calcul de l'indice de confiance.

Le temps de dégonflage mesuré, **Tm**, n'est proportionnel au volume de l'air présent dans le réservoir que si la pression statique est restée sensiblement constante pendant la phase de dégonflage.

Dans les basses couches la pression statique varie de 1 kPa tous les 280 pieds environ.

Donc si, par exemple, l'avion est en montée à 840 ft/min, la pression statique diminue de 1 kPa toutes les 20 secondes. Et si le dégonflage a duré 40 secondes, cela veut dire que $P_{sf} - P_{sd} = -2$ kPa.

Le réservoir ne s'est pas dégonflé de 4 kPa, mais de $4 \text{ kPa} - (P_{sf} - P_{sd}) = 6$ kPa, et même si la pression d'échappement a été, en moyenne, de 1 kPa plus basse $(P_{sf} - P_{sd}) / 2$, le temps de dégonflage a été augmenté par la montée.

Si on calculait directement le volume d'air dans le réservoir à partir du temps mesuré, le résultat serait surestimé, et par conséquent le volume de carburant serait sous-estimé.

Si, au contraire, l'avion est en descente à 1680 ft/min, la pression statique augmente de 1 kPa toutes les 10 secondes. Et si le dégonflage a duré 30 secondes, cela veut dire que $P_{sf} - P_{sd} = +3$ kPa.

Le réservoir ne s'est pas dégonflé de 4 kPa, mais de $4 \text{ kPa} - (P_{sf} - P_{sd}) = 1$ kPa, et même si en moyenne, la pression d'échappement a été 1,5 kPa plus haute $(P_{sf} - P_{sd}) / 2$, le temps de dégonflage a été diminué par la descente.

Si on calculait directement le volume d'air dans le réservoir à partir du temps mesuré, le résultat serait sous-estimé, et par conséquent le volume de carburant serait surestimé.

Le calcul montre que pour corriger l'effet de la variation de pression statique, il faut multiplier le temps mesuré par le coefficient **Cps** défini par :

$$Cps = e^x \quad \text{où} \quad x = \frac{2(P_{sf} - P_{sd})}{D_{ph} - D_{pb}}$$

(La variable x est bien sans dimension et lorsque la pression statique est constante, Cps = 1)

En théorie, et même avec une calculatrice scientifique de poche, le calcul d'une exponentielle ne pose aucun problème... mais un petit microcontrôleur bon marché n'est généralement pas doté d'une capacité de calcul et de mémoire suffisante pour programmer ce genre de fonctions.

D'autre part, la formule de **Cps** repose sur l'hypothèse que la variation de pression statique est constante, c'est-à-dire que la vitesse verticale a été constante pendant toute la phase de dégonflage, ce qui est d'autant moins garanti que le temps de dégonflage est long et/ou que la variation d'altitude est importante.

Heureusement, la formule de **Cps** est à utiliser pour un domaine de vitesses verticales centré autour de zéro. Il est donc légitime de calculer son développement limité autour de zéro selon la formule de Taylor.

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

A quel ordre pousser le calcul ?

Il semble à la fois suffisamment précis et pas trop lourd en calcul de calculer **Cps** à l'ordre 2.

Pour x proche de zéro, l'erreur est du même ordre de grandeur que le terme suivant : $\frac{x^3}{6}$

- Pour x égal à 40%, l'erreur systématique sur Cps est d'environ 1%.
- Pour x égal à 85%, l'erreur systématique sur Cps est d'environ 10%.

Dans un premier temps, on calcule la variable intermédiaire x , puis son carré, x^2 , avant de calculer :

$$\mathbf{Cps} = 1 + x + \frac{x^2}{2}$$

Il est alors facile de calculer le temps de dégonflage corrigé de la variation de pression statique **Tcp** :

$$\mathbf{Tcp} = \mathbf{Tm} \times \mathbf{Cps}$$

Indice de confiance

L'indice de confiance, **Ic**, est un coefficient variant entre 0 et 1, qui indique la précision de la mesure effectuée. Il tient compte de l'erreur systématique liée à la méthode de calcul indiquée ci-dessus, mais aussi de l'incertitude sur la régularité de la variation d'altitude.

Afin de limiter les calculs, il est judicieux d'utiliser une variable déjà calculée : x^2 .

$$\mathbf{Ic} = 1 - x^2 \quad \text{pour } x^2 < 1$$

et

$$\mathbf{Ic} = 0 \quad \text{pour } x^2 \geq 1$$

Remarque : En fait, **Ic** n'est introduit ici que dans un souci d'explication, mais son calcul n'est pas nécessaire. Il suffit de tester x^2 dès qu'il est calculé, c'est à dire avant de calculer **Cps**, car :

- si $x^2 \geq 1$, la mesure n'est pas prise en compte et il est donc inutile de poursuivre le calcul,
- si $x^2 < 1$, c'est x^2 qui sert directement au calcul du volume de carburant affiché.

5 – Correction de l'altitude et de la température.

Le temps de dégonflage compensé de la vitesse verticale **Tcp** est proportionnel à la racine carrée de la densité de l'air présent dans le réservoir.

Il suffit donc de diviser le temps de dégonflage mesuré par la racine carrée de la densité de l'air pour obtenir une variable indépendante de l'altitude et de la température qui soit proportionnelle au volume de gaz présent dans le réservoir.

La loi des gaz parfaits indique que la densité de l'air sec est proportionnelle à pression statique et inversement proportionnelle à la température absolue.

La température absolue, en kelvin, est égale à la température en degrés Celsius plus 273,25.

Il suffit donc de diviser la température absolue **Θ** par la pression statique **Psd** et de calculer la racine carrée du résultat pour obtenir un facteur multiplicatif pour obtenir une variable **Va** proportionnelle au volume d'air présent dans le réservoir.

$$Va = Tcp \times \sqrt{\frac{\theta}{Psd}}$$

Cependant, mais un petit microcontrôleur bon marché n'est pas plus capable d'extraire une racine carrée que de calculer une exponentielle. Il est donc plus judicieux, (car le calcul est beaucoup moins lourd !) de calculer directement **Va²**, le carré de la variable **Va**, selon la formule :

$$Va^2 = \frac{Tcp \times Tcp \times \theta}{Psd}$$

La variable **Va²** est donc, une variable indépendante de tous les facteurs d'influence principaux (vitesse verticale, altitude, et température), et proportionnelle au carré du volume d'air présent dans le réservoir.

6 – Table d'étalonnage

Le volume de carburant **Vc** présent dans le réservoir de volume **Vres** est donc :

$$Vc = Vres - K\sqrt{Va^2}$$

En pratique, les réservoirs des avions sont souvent de forme très complexe, et le volume **Vres** n'est pas forcément connu avec la précision requise.

Ensuite, le coefficient **K** dépend essentiellement du circuit de mesure et en particulier de la valeur de la restriction R1, laquelle est réglée de telle manière que le temps de dégonflage soit :

- suffisant pour être mesuré quand le réservoir est plein,
- pas trop long lorsque le réservoir est vide, ou presque.

Il est donc nécessaire d'identifier le coefficient **K** après le réglage de la restriction.

Enfin, ne disposant toujours que du même microcontrôleur à la capacité de calcul très limitée, il n'est toujours pas judicieux de calculer la racine carrée de **Va²**.

La meilleure manière pour résoudre d'un seul coup toutes ces difficultés consiste à identifier une table d'étalonnage de **Vc** en fonction de **Va²** :

On commence par mesurer **Va²(0)** avec un réservoir complètement vide.

Ensuite on ajoute une quantité de carburant connue (par exemple 5 litres) et mesure **Va²(5)**, et on réitère l'opération jusqu'à ce que le réservoir soit plein.

On obtient donc directement une table d'étalonnage qui permet de déterminer par interpolation le volume de carburant présent dans le réservoir **Vc** à partir de n'importe quelle valeur mesurée de **Va²**.

*Cependant, il est plus judicieux d'utiliser cette table pour identifier les variables **Vres** et **K** à l'aide d'un ordinateur. Puis à partir de ces variables, d'établir la table d'étalonnage la plus courte possible qui permette d'atteindre la précision désirée pour la détermination de **Vc** par interpolation par le microcontrôleur.*

7 - Elaboration des volumes de carburant mesurés et affichés sans débitmètre

Le système de jauge peut être utilement complété par un débitmètre. Le système prenant en compte un débitmètre est décrit au paragraphe 8. Mais le système peut aussi fonctionner sans débitmètre, comme indiqué ci-dessous

Après la mise sous tension, le système effectue la mesure à intervalles réguliers, par exemple, toutes les 3 minutes.

Cas de la première mesure après la mise sous tension du système de jauge.

Lors de la première mesure, l'avion est à l'arrêt au sol, la variation de pression statique (**Psf - Psd**) est quasiment nulle, ce qui signifie que **x²** est proche de 0 et donc que la mesure est valide.

La variable **Vp**, volume de carburant précédent, est exceptionnellement chargée avec le premier volume de carburant issu du calcul, **Vc**.

La variable **Vca**, volume de carburant affiché est chargée avec le premier volume de carburant issu du calcul, **Vc**.

Le débit de carburant estimé **Dce** est de calculé selon la formule :

$$Dce = (Vp - Vca) \times \frac{\text{Période d'affichage}}{\text{Période de mesure}}$$

Pour cette première mesure, comme les variables **Vp** et **Vca** ont été chargée avec la même valeur **Vc**, **Dce** est égale à 0.

Le volume de carburant affiché **Vca** est recalculé à intervalles réguliers rapprochés, par exemple toutes les 5 secondes. Ce calcul consiste à retrancher le débit de carburant estimé **Dce** de la valeur affichée précédente. Mais comme, **Dce** est égal à zéro pendant la période qui sépare la première mesure de la deuxième, le volume de carburant affiché **Vca** reste constant.

Dans le cas d'un passage à la pompe, avec naturellement la mise hors tension des auxiliaires électriques dont la jauge, il est à noter que le système est en position repos et que le réservoir est donc à la pression

de la prise de pression totale, qui à vitesse nulle, correspond à la pression statique. On peut donc ouvrir le bouchon étanche du réservoir sans aucun risque.

Connaissant la quantité de carburant affichée par le volucompteur de la pompe, la mesure à la remise sous tension de la jauge après l'avitaillement permet de contrôler sa précision pratique entre deux mesures initiales.

Cas des mesures suivantes.

Pour les mesures suivantes, l'élaboration du volume de carburant affiché **Vca** prend en compte la qualité de la mesure, c'est à dire la valeur de x^2 :

Au moment de la nouvelle mesure, la variable **Vp** est chargée avec la valeur de **Vca**, c'est-à-dire le volume de carburant affiché qui tient compte de la valeur établie lors de la mesure précédente et de **Dce**, le débit de carburant estimé.

La nouvelle valeur de **Vca** est calculée à l'aide de la formule :

$$Vca = (Vp \times x^2) + Vc \times (1 - x^2)$$

Si la pression statique à peu varié, x^2 est proche de 0 et la mesure **Vc** est raisonnablement juste. Dans ce cas, **Vca** est proche de la nouvelle valeur mesurée **Vc**.

Si, au contraire, la pression statique à beaucoup varié, x^2 est proche de 1 et la mesure **Vc** est peu fiable. Dans ce cas, **Vca** est proche de l'ancienne **Vca** calculée par extrapolation.

Le débit de carburant estimé **Dce** est de nouveau calculé selon la formule :

$$Dce = (Vp - Vca) \times \frac{\text{Période d'affichage}}{\text{Période de mesure}}$$

Le volume de carburant affiché **Vca** continue d'être recalculé à intervalles réguliers rapprochés. Comme **Dce** prend en compte la variation de volume mesuré entre la précédente valeur affichée et la valeur affichée actualisée, le volume de carburant affiché **Vca** évolue selon la pente moyenne de la précédente période de 3 minutes.

8 - Elaboration des volumes de carburant mesurés et affichés avec débitmètre

Si on dispose d'un débitmètre qui fournit un variable de débit de carburant **Dc**, il n'est plus nécessaire d'estimer cette valeur. La séquence d'élaboration de la variable « volume de carburant affiché », **Vca**, s'en trouve considérablement simplifiée :

Cas de la première mesure après la mise sous tension du système de jauge.

Lors de la première mesure, l'avion est à l'arrêt au sol, la variation de pression statique (**Psf - Psd**) est quasiment nulle, ce qui signifie que x^2 est proche de 0 et donc que la mesure est valide.

La variable **Vca**, volume de carburant affiché est chargée avec le premier volume de carburant issu du calcul, **Vc**.

Le volume de carburant affiché **Vca** est recalculé à intervalles réguliers rapprochés, compatible avec la fréquence de rafraîchissement de la valeur de sortie du débitmètre, **Dc**.

Ce calcul consiste à retrancher le débit de carburant estimé **Dc** de la valeur affichée précédente.

Cas des mesures suivantes.

Pour les mesures suivantes, l'élaboration du volume de carburant affiché **Vca** prend en compte la qualité de la mesure, c'est à dire la valeur de x^2 :

Au moment de la nouvelle mesure, la variable **Vp** est chargée avec la valeur de **Vca**, c'est-à-dire le volume de carburant affiché qui tient compte de la valeur établie lors de la mesure précédente et de l'intégration sur la période de mesure du débit de carburant, **Dc**.

La nouvelle valeur de **Vca** est calculée à l'aide de la formule :

$$Vca = (Vp \times x^2) + Vc \times (1 - x^2)$$

Si la pression statique à peu varié, x^2 est proche de 0 et la mesure **Vc** est raisonnablement juste. Dans ce cas, **Vca** est proche de la nouvelle valeur mesurée **Vc**.

Si, au contraire, la pression statique à beaucoup varié, x^2 est proche de 1 et la mesure **Vc** est peu fiable. Dans ce cas, **Vca** est proche de l'ancienne **Vca** calculée par l'intégration sur la période de mesure du débit de carburant, **Dc**.

Le volume de carburant affiché **Vca** continue d'être recalculé à intervalles réguliers rapprochés. L'erreur d'intégration de la mesure du débitmètre étant beaucoup plus fiable que l'extrapolation à partir des deux mesures de volume précédentes, il est possible d'espacer les mesures de volume sans perte de précision.

Une périodicité de mesure de 10 minutes, voire plus peut être envisagée.