

Jaugeurs de carburant pour avions légers

Second chapitre (JA2)

Le chapitre précédant (JA1) présente différents systèmes de jaugeurs de carburant pour avions légers. La plupart sont basés sur une mesure de niveau dans le réservoir.

Les principaux inconvénients de ces jaugeurs tiennent à ce qu'un réservoir d'avion :

- subit des accélérations variables et qu'on a couramment recours à des séparations internes perforées appelées « cloisons anti-ballotement » pour limiter les mouvements du carburant,
- se trouve dans un avion qui, même en vol stabilisé, est plus ou moins cabré,
- est souvent plus long et/ou large que haut,
- a une section horizontale variable
- peut être composé de plusieurs réservoirs individuels connectés entre eux,
- de l'air peut parfois être piégé à certains moments dans des points hauts locaux.

Un jaugeur de carburant d'avion devrait donc être insensible :

- aux mouvements du carburant dans le réservoir,
- à la forme du réservoir,
- à la présence d'air piégé à certains moments dans des points hauts locaux.

Ces exigences éliminent donc les mesures du niveau en un seul lieu par réservoir. Les mesures en plusieurs lieux par réservoir réduisent l'erreur mais ne résolvent pas totalement le problème.

Au chapitre précédent, on a vu que les mesures de pesage directes, telles que les mesures de pression en bas de réservoir, ou indirectes telles que le calcul de la masse de l'avion, sont très perturbées par les accélérations et/ou trop imprécises.

UNE APPROCHE DIFFERENTE

Le volume du réservoir est égal au volume de tout ce qu'il contient, c'est-à-dire du carburant... et un gaz composé essentiellement d'air (et de vapeurs de carburant).

Cela revient à dire que le volume du carburant est égal au volume du réservoir, moins le volume du gaz. Il n'existe pas de manière simple de mesurer directement le volume du carburant. Par contre, il est facile de connaître le volume du réservoir. Donc il suffit de mesurer le volume du gaz qui est dans le réservoir en plus du carburant, pour calculer le volume de carburant par une simple soustraction.

Cela ressemble à remplacer un problème insoluble par un autre tout aussi irréalisable. Pourtant, il y a une grosse différence entre un liquide et un gaz : le liquide est pratiquement incompressible, mais le gaz est compressible, et cela ouvre des perspectives pour mesurer son volume.

METHODE DE DETECTION DE LA FREQUENCE DE RESONNANCE DU VOLUME D'AIR.

Si on souffle dans une bouteille vide comme dans une flute, on obtient une note. En rajoutant progressivement de petites quantités d'eau à l'intérieur de la bouteille, on obtient des notes de plus en plus aiguës.

Autrement dit, la fréquence de résonance du volume d'air de la bouteille est d'autant plus élevée que le volume d'air est petit.

Supposons que nous disposons d'un haut-parleur et un microphone placé à proximité. Le haut-parleur est alimenté par un générateur de signal qui produit une sinusoïde d'amplitude constante, mais de fréquence croissante depuis une note grave jusqu'à une note aiguë. Le microphone produirait un signal électrique sinusoïdal de même fréquence croissante que celui du générateur de signaux, et d'amplitude quasiment constante sur toute la plage de fréquence balayée.

Si maintenant nous plaçons le haut-parleur et le microphone dans un réservoir. Aux fréquences éloignées de la fréquence de résonance de l'air du réservoir, l'amplitude du signal électrique est également quasiment constante. Mais cette amplitude augmente en se rapprochant de la fréquence de résonance, et atteint un maximum à cette fréquence de résonance.

A l'aide d'un système dit de « détection synchrone », qui n'est jamais qu'une autocorrélation dans le domaine fréquentiel, il est facile d'éliminer les bruits parasites (moteur de l'avion) et de mesurer précisément le moment du passage du pic d'amplitude et donc de connaître précisément la fréquence émise par le générateur de signaux à ce moment, qui est égale à la fréquence de résonance.

Comme cette fréquence de résonance est directement fonction du volume d'air dans le réservoir, elle est tout aussi directement fonction de la quantité de liquide présent dans le réservoir... Après étalonnage, on dispose donc d'une mesure précise du volume de carburant présent dans le réservoir.

Pourquoi ne pas employer directement cette méthode dans le liquide ?

Le liquide est très peu compressible et les résonances qu'on observe sont non seulement à une fréquence beaucoup plus élevée (ultrasons) mais surtout dues aux réflexions des signaux sur les parois du réservoir. Déduire le volume de liquide des différentes fréquences de résonance mesurées est beaucoup plus difficile, voire pratiquement impossible.

La mesure de la fréquence de résonance de l'air est-elle une bonne jauge de carburant ?

Malheureusement non !

Cette technique fonctionne bien pour des volumes sans grandes parois planes en vis-à-vis et dont toutes les dimensions sont du même ordre de grandeur, comme des bouteilles, des amphores, des silos cylindro-coniques, etc.

Outre les difficultés techniques de mise en œuvre d'un tel système dans un réservoir de carburant d'avion, le volume résiduel de ces réservoirs est souvent trop plat et donc beaucoup plus long ou large que haut. Dans cette configuration les fréquences de résonance du son entre les parois les plus éloignées peuvent être à une proche voire inférieure à celle de la résonance du volume. Il est donc très difficile, voire impossible de discriminer les fréquences de résonance

METHODE DE MESURE DE VOLUME PAR GONFLAGE/DEGONFLAGE

Pour éviter la difficulté de discrimination des fréquences de résonance, utiliser une fréquence d'excitation de fréquence différente des fréquences de résonances entre parois ou de volume.

Les résonances se produisant non seulement aux fréquences fondamentales, mais aussi à leurs multiples (fréquences harmoniques) augmenter la fréquence d'excitation ne résout pas le problème.

Réduire la fréquence revient à faire « respirer le volume » par des variations relativement lentes de la pression interne, et d'en déduire le volume compressible, c'est-à-dire le volume de gaz et par conséquent le complément de volume incompressible, c'est-à-dire le volume de carburant. C'est sur ce principe, que se base le système présenté ci-après.

Constante de temps de gonflage ou de dégonflage

Si on gonfle un pneu à l'aide d'un pistolet de gonflage alimenté par un compresseur dont le réservoir est supposé infini. Il faut un certain temps de gonflage (T_g) pour que la pression dans le pneu monte d'une pression (P_1) à une pression (P_2). Et il faut un certain temps de dégonflage (T_d) pour que la pression dans le pneu redescende de la pression (P_2) à la pression (P_1).

Toutes choses égales par ailleurs, les temps T_g et T_d sont proportionnels au volume interne du pneu.

Donc à l'aide de faibles variations de pression, le temps de gonflage ou de dégonflage du réservoir entre deux pressions préétablies, on peut mesurer le volume du gaz présent dans un réservoir, et en déduire le volume du carburant.

Quelles sont les pressions maximales à prendre en compte ?

La pression de gonflage ne doit pas déformer irréversiblement, et encore moins déchirer le réservoir. Bien sûr, on pourrait construire un réservoir volontairement renforcé, mais ça induirait une augmentation de sa masse, et le système ne serait pas utilisable sur un avion existant.

Un réservoir standard est dimensionné pour résister à la pression hydrostatique du réservoir plein sous le facteur de charge le plus élevé. Supposons que la hauteur du réservoir est de 0,25 m et le facteur de charge maximal 6 g. Comme la masse volumique de l'essence est de 720 kg/m³, la pression hydrostatique au bas du réservoir est donc :

$$P_h = 720 \times 6 \times 9,81 \times 0,25 = 10,6 \text{ kPa (soit environ 10\% de la pression atmosphérique)}$$

10 kPa constituent donc une valeur limite raisonnable pour la surpression de gonflage

Un réservoir standard pourrait vraisemblablement supporter une dépression d'amplitude comparable à la surpression calculée ci-dessus. Mais les avions légers ne sont généralement pas équipés de pompes de réservoirs comme le sont toutes les automobiles récentes. Rien n'interdirait d'équiper les avions légers de construction amateur de telles pompes, mais en leur absence, il n'est pas souhaitable de mettre le réservoir en dépression.

La pression interne du réservoir ne doit pas descendre en dessous de la pression statique.

Gamme de mesure de pression

On trouve des capteurs de pression légers, fiables et bon marché dont la plage de mesure est de 0 à 6 kPa (ou de ± 6 kPa pour les capteurs de pression différentielle).

Il semble donc judicieux de limiter la pression de gonflage à 6 kPa (soit environ 6% de la pression atmosphérique)

Sources de dépression.

Le moteur de l'avion peut-il constituer une source de dépression ?

Sur les automobiles, on utilise de longue date des servofreins dont la source de dépression est la pipe d'admission du moteur (en aval du papillon des gaz). Il est cependant à noter que lorsqu'on freine avec une voiture, la pédale d'accélérateur est relâchée et donc la dépression dans la pipe d'admission est importante.

Dans le cas d'un moteur d'avion en vol dans lequel le papillon des gaz est la plupart du temps proche de la pleine ouverture, la pression d'admission est proche de la pression statique. Ceci ne constitue pas un problème pour le système de jauge dans la mesure où la pression dans le réservoir ne doit pas descendre en dessous de la pression statique. Par contre, l'injection d'air par le système de jauge peut poser des problèmes au moteur lorsque les gaz sont réduits. Et d'autre part, la pression d'admission varie avec la position du papillon des gaz, ce qui complique le fonctionnement de la jauge.

L'utilisation du moteur comme source de dépression est à proscrire.

Une zone de culot du fuselage peut-elle constituer une source de dépression ?

Dans une zone de culot, on peut mesurer une dépression par rapport à la pression statique qui est du même ordre de grandeur que la pression dynamique. Cette dépression varie comme le carré de la vitesse indiquée, ce qui complique également le fonctionnement de la jauge.

Comme indiqué précédemment, la pression la plus basse admissible étant la pression statique, une prise de pression statique dédiée à cet usage constitue naturellement la meilleure source possible de dépression.

Sources de surpression.

La pression dynamique semble une source de surpression à la fois élégante, légère et économique. Mais outre le fait que le système de jauge ne fonctionnerait qu'en vol, la pression dynamique n'est suffisante qu'au-delà de vitesses très élevées pour un avion léger.

- Une pression dynamique de 6 kPa correspond à une vitesse de 192,4 kt IAS (356 km/h)
- Une pression dynamique de 3 kPa correspond à une vitesse de 136,1 kt IAS (252 km/h)

Même si une source de pression issue du moteur ne permettrait d'alimenter la jauge que lorsqu'il tourne, le moteur de l'avion peut-il constituer une source de surpression ?

1/ Gaz d'échappement

Sur le MC15 Cri-cri de Michel Colombar, une prise de pression est placée dans la partie centrale du pot d'échappement pour pressuriser le réservoir. Cette solution légère et élégante a aussi l'avantage de remplir le réservoir avec des gaz d'échappement qui contiennent très peu d'oxygène, ce qui réduit les risques liés à l'atmosphère potentiellement explosive normalement présente dans les réservoirs de carburant. Il faut néanmoins noter que le MC15 est équipé de moteurs 2 temps et que la partie centrale (la plus large) d'un résonateur d'échappement est naturellement en surpression.

Pour un moteur à quatre temps, il est plus difficile de trouver une source de pression. D'une part l'échappement est construit pour limiter la contrepression Et d'autre part, si la vitesse moyenne des gaz d'échappement d'un moteur d'avion au régime de croisière est relativement élevée (de 75 à 125 m/s), leur densité est faible à cause de la température, ce qui diminue d'autant la pression dynamique. Enfin, même refroidis, les gaz d'échappement restent acides, humides et donc corrosifs, ce qui n'est pas une bonne chose pour les utiliser avec des électrovannes.

Les gaz d'échappement du moteur sont donc à proscrire pour pressuriser les réservoirs de carburant.

2/ Le reniflard

Dans un moteur à quatre temps à quatre ou six cylindres en ligne ou opposés, le carter constitue un volume quasi-constant dans lequel une petite quantité des gaz comprimés entre les culasses et les pistons fuit. Ces gaz qui contiennent aussi bien des gaz frais, des gaz de combustion et un peu du brouillard d'huile présent dans le carter, sont évacués à l'extérieur du carter par un tube, le « reniflard ».

Sur les automobiles, dans un but de propreté, le reniflard débouche généralement dans la canalisation d'air d'admission, entre le filtre à air et le papillon des gaz. Le moteur ingère donc les gaz du reniflard.

Sur les avions, on évite de renvoyer les gaz du reniflard au carburateur pour éviter des risques d'inflammation d'huile quand on alimente le moteur avec de l'air chaud (réchauffage carburateur). Le reniflard est raccordé à un pot destiné à récupérer l'huile issue du brouillard d'huile entraîné par les gaz, puis à un tuyau qui débouche à l'extérieur.

Le carter du moteur et le circuit du reniflard peuvent certainement supporter une suppression de 6 ou même 10 kPa. Par contre les gaz du reniflard sont chargés en huile, et rien n'indique que le débit du reniflard serait suffisant pour alimenter le système de jauge.

Les gaz du reniflard sont donc à proscrire pour pressuriser les réservoirs de carburant.

3/ Le refoulement de la pompe à vide

Pour les avions équipés d'une pompe à vide attelée au moteur pour alimenter les instruments à dépression, le refoulement de cette pompe pourrait constituer une source d'air propre et raisonnablement sec, de débit suffisant.

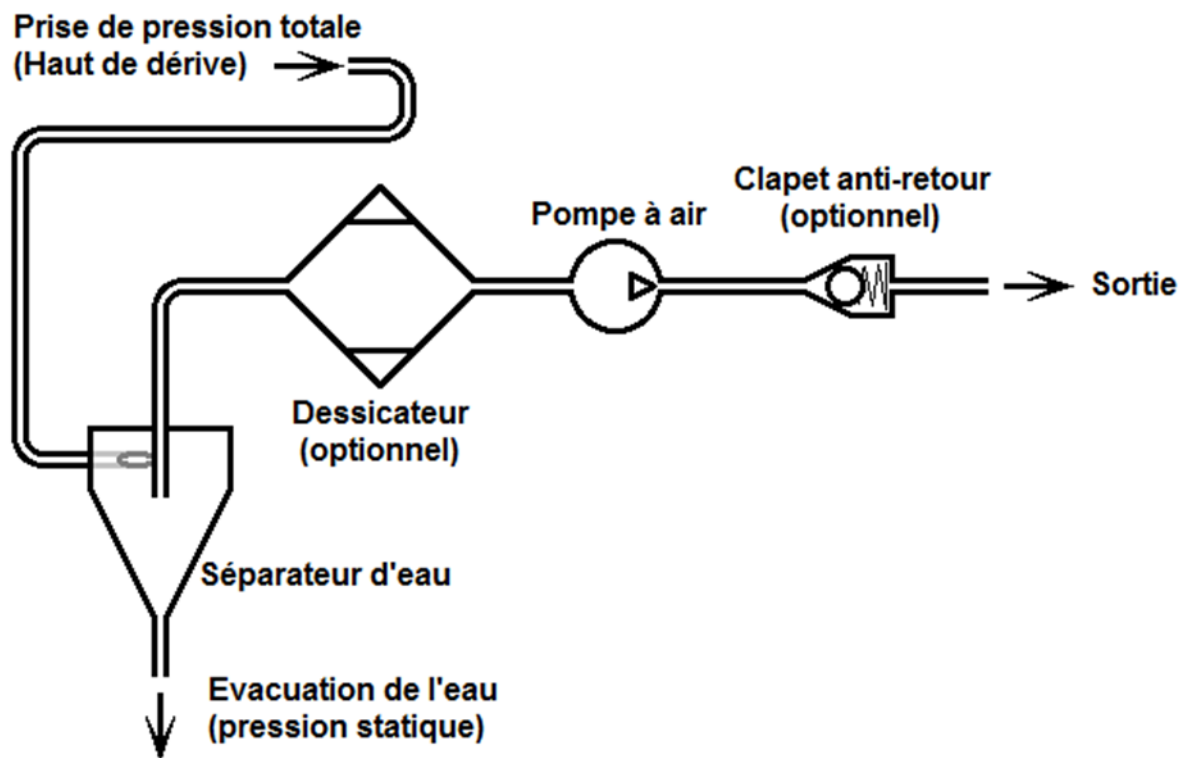
Cependant, surcharger la pompe à vide au refoulement risque de nuire à sa fiabilité, et par conséquent à la fiabilité des instruments de navigation.

L'air issu du refoulement de la pompe à vide est donc également à proscrire pour pressuriser les réservoirs de carburant.

Pompe électrique dédiée.

On a vu ci-dessus que la jauge a besoin d'une source d'air dédiée. Fort heureusement, on trouve de petites pompes électriques (12V courant continu) pour aquarium qui sont à la fois suffisantes, très robustes, peu puissantes et bon marché.

Schéma du module de pompage d'air



La prise de pression totale et le tuyau menant au séparateur d'eau est de diamètre intérieur suffisant (≥ 8 mm, par exemple) pour alimenter le système en limitant les pertes de pression malgré le débit de fuite du séparateur d'eau et le débit de la pompe.

Le séparateur d'eau de type cyclone est le premier dispositif d'assèchement (et de dépoussiérage) de l'air admis. L'évacuation de l'eau se fait par une conduite de section suffisante, mais inférieure (≤ 6 mm) à celle de la prise de pression totale pour limiter le débit de fuite, débouchant sous l'avion à un endroit où la pression est sensiblement égale à la pression statique.

Pour parfaire le séchage de l'air admis par la pompe, on peut rajouter un dessiccateur dont le gel de silice peut être régénéré au sol (passage au four). L'utilité du dessiccateur est fonction de l'humidité moyenne de l'air à la sortie du séparateur : ce dispositif est optionnel.

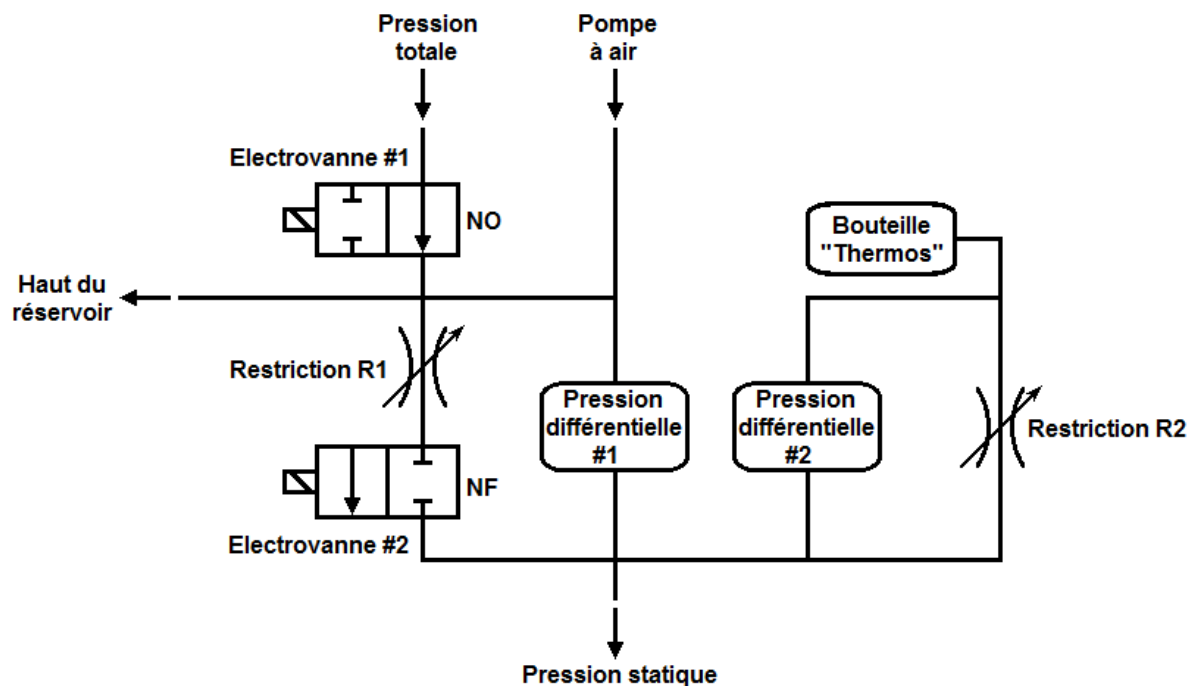
Les petites pompes électriques (12V courant continu) pour aquarium ont un débit d'environ 50 litres par heure et par watt. Une pompe de 6 watts (donc 0,5 A sous 12 V), qui débite donc environ 300 litres à l'heure, gonfle de 6 kPa un volume de 80 litres en une minute. Pour une mesure toutes les trois minutes, la consommation moyenne de la pompe n'est plus que de 2 W.

Le clapet anti-retour a pour but d'éviter toute fuite d'air chargé en vapeurs de carburant à travers le module pompe, ce qui risquerait de détruire la pompe et surtout fausserait la mesure du temps de dégonflage.

Comme la plupart des pompes d'aquarium sont de type à membranes, elles disposent de leur propre clapet anti-retour. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de rajouter un clapet anti-retour externe.

Une version simplifiée du module de pompage d'air pourrait se réduire à la seule pompe électrique placée dans le fuselage de l'avion, et aspirant l'air présent dans le fuselage. Mais pour profiter de la contribution de la pression dynamique, il faut une prise de pression dynamique, et donc un moyen de se débarrasser de l'humidité qui pourrait pénétrer dans le système.

Schéma du module de mesure



Le module de mesure se compose de deux électrovannes, deux restrictions réglables, deux capteurs de pression différentielle, une bouteille « thermos » et de 4 raccordements vers :

- la prise de pression totale,
- la pompe à air,
- la prise de pression statique,
- le haut du réservoir.

La restriction R1 est réglée en fonction du volume du réservoir.

La restriction R2 est réglée en fonction de la plage de mesure du capteur de pression différentielle #2 et de la constante de temps d'intégration voulue.

Fonctionnement du module de mesure

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 #1 indique la surpression dans le réservoir qui suit, avec un certain retard, la pression dynamique.

Le capteur de pression différentielle #2 indique l'écart de pression entre la pression statique et la pression dans une bouteille isotherme liée à la pression statique à l'aide de la restriction #2. A un facteur d'échelle près dépendant du réglage de la restriction #2, ce capteur lit la vitesse verticale de l'avion.

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 #1.

Quand cette surpression atteint la valeur de consigne haute prédéterminée (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.

L'électrovanne #2 est alimentée. Elle est ouverte. Un chronomètre est démarré. Le réservoir se dégonfle à travers la restriction réglable #1

La surpression décroissante dans le réservoir est mesurée par le capteur de pression différentielle #1.

Quand cette surpression atteint la valeur de consigne basse prédéterminée (par exemple 1 kPa) le chronomètre est arrêté. Le réservoir est dégonflé.

La valeur de l'horloge (t) correspondant à la mesure est notée. Les électrovannes #1 et #2 ne sont plus alimentées. L'électrovanne #1 est ouverte et l'électrovanne #2 fermée.

Le réservoir est de nouveau dans la phase (1 – Repos).

4 - Elaboration de la mesure à l'instant (t) et de son indice de confiance

La pression différentielle mesurée par le capteur #2 à l'instant (t) est l'image de la variation de la pression statique pendant la phase de dégonflage.

En supposant que la variation d'altitude correspondante a été régulière, c'est-à-dire à V_z constante, on peut :

- corriger le temps mesuré par le chronomètre en fonction de la pression différentielle mesurée par le capteur #2. Ce temps corrigé étant proportionnel au volume du gaz dans le réservoir, il permet donc de calculer le volume complémentaire occupé par le carburant à l'instant t : $V_c(t)$.
- calculer un indice de confiance $I_c(t)$, compris entre 0 et 1, et qui est d'autant plus petit que la pression différentielle mesurée par le capteur #2 est grande.

5 - Elaboration de la valeur affichée – Lissage pondéré

Cas des premières mesures après la mise sous tension du système de jauge.

La première valeur affichée (V_a) est la première valeur calculée après la première mesure. Comme l'avion est à l'arrêt au sol, la variation de pression statique mesurée par le capteur de pression différentielle #2 est quasiment nulle et l'indice de confiance est proche de 1.

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.

La mesure est répétée à intervalles réguliers, par exemple, toutes les 3 minutes.

La deuxième mesure calculée après la mise sous tension du système est également affichée directement.

Cas des mesures suivantes.

A partir de la troisième mesure, c'est une moyenne pondérée avec tendance qui est affichée :

A partir des deux mesures précédentes affichées ($t - 6$ minutes, et $t - 3$ minutes), on calcule une valeur estimée de la quantité de carburant présente dans le réservoir à l'instant t , $V_e(t)$, par la formule :

$$V_e(t) = 2 \times V_a(t - 3 \text{ minutes}) - V_a(t - 6 \text{ minutes})$$

Ce qui revient à estimer que la consommation de carburant pendant les trois dernières minutes est égale à celle des trois minutes précédentes.

Ensuite, on calcule la nouvelle valeur affichée, $V_a(t)$, à partir de la valeur estimée, $V_e(t)$, de la valeur calculée, $V_c(t)$, et de l'indice de confiance de cette dernière, $I_c(t)$, par la formule :

$$V_a(t) = V_c(t) \times I_c(t) + V_e(t) \times (1 - I_c(t))$$

Si l'indice de confiance est proche de 1, cela revient pratiquement à afficher la valeur calculée à partir de la mesure du temps de dégonflage.

Par contre, si l'indice de confiance est proche de 0, cela revient pratiquement à afficher la valeur estimée à partir des valeurs affichées précédentes en négligeant la mesure du temps de dégonflage qui est incertaine.

Prise en compte d'un débitmètre

Si on dispose d'un débitmètre, il est bien entendu plus intéressant de calculer $V_e(t)$ à partir de la valeur affichée précédente $V_a(t - 3 \text{ minutes})$ et du cumul des mesures dans les 3 dernières minutes.

Il est alors possible d'espacer les mesures à 5 minutes, voire 10 minutes, sans perte de précision.