

Mesures de températures

Températures mesurées sur un aéronef

- Sur un aéronef, les températures les plus fréquemment rencontrées par rapport à l'extérieur de l'appareil sont les suivantes :

- OAT – Outside Air Temperature : Température extérieure de l'air.
- SAT – Static Air Temperature : Température statique de l'air.
- TAT – Total Air Temperature : Température totale de l'air.



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Températures mesurées sur un aéronef

- Sur un aéronef, les températures les plus fréquemment rencontrées par rapport à l'intérieur de l'appareil et à ses moteurs sont les suivantes :

- CHT – Cylinder Head Temperature : Température de culasse.
- EGT – Exhaust Gas Temperature : Température des gaz d'échappement.
- Température d'entrée d'air du carburateur.
- Températures diverses : huile, carburant, air de prélèvement moteur, zones de l'aéronef (protection), etc.



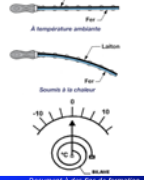
© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Thermomètre à dilatation de solides (bilame) :

- Deux lames métalliques de matériaux ayant des coefficients de dilatation différents sont soudées ensemble.
- Soumis à la chaleur, le bilame se courbe.
- Un bilame peut être droit, en « U », en hélice ou en spirale.
- Le bilame entraîne un mécanisme d'indication sur un cadran.
- Il s'agit d'un système simple, mais peu précis.



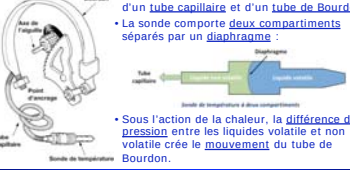
© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Thermomètre à tension de vapeur :

- Ce thermomètre est constitué d'une sonde, d'un tube capillaire et d'un tube de Bourdon.
- La sonde comporte deux compartiments séparés par un diaphragme.
- Sous l'action de la chaleur, la différence de pression entre les liquides volatile et non volatile crée le mouvement du tube de Bourdon.



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Thermomètre à résistance :

- Ce thermomètre est constitué d'une sonde de température, et d'un indicateur.
- La sonde et l'indicateur sont reliés par des fils électriques.
- Il existe deux sortes d'indicateurs :



Le galvanomètre



Le logomètre

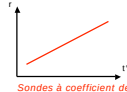
© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

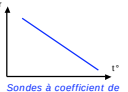
Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Thermomètre à résistance :

- Il existe deux sortes de sondes résistives de température :



Sondes à coefficient de température positif (CTP)



Sondes à coefficient de température négatif (CTN)

- Habituellement, les conducteurs ont un CTP.
- Les thermistances ont un CTN et sont généralement plus sensibles tout en ayant une variation de résistance plus linéaire que les sondes à CTP.

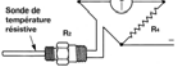
© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Thermomètre à résistance :

- Le principe du pont de Wheatstone est souvent utilisé pour les mesures réalisées à l'aide de sondes de température résistives :



Le pont sera en équilibre (aucune déviation sur l'indicateur) lorsque :

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4}$$

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Pyromètre à radiation :

- Les radiations émises par un corps sont fonction de sa température et de son émissivité (capacité d'émettre des radiations).
- Si nous connaissons l'émissivité d'un métal, nous pouvons déterminer sa température en mesurant ses radiations.
- Les pyromètre à radiation sont habituellement prévus pour effectuer des mesures à hautes températures.



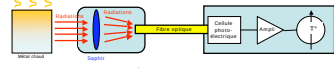
© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Pyromètre à radiation :

- Le capteur de ce pyromètre est constitué d'un saphir qui, agissant comme une lentille, localise les radiations vers un conduit de fibres optiques :



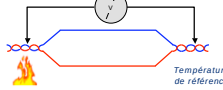
- Le signal lumineux représentant le niveau de radiation est acheminé à une cellule photo-électrique qui convertit l'intensité lumineuse en signal électrique.
- Celui-ci est ensuite amplifié et acheminé à l'indicateur de température.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Thermomètre à thermocouple :



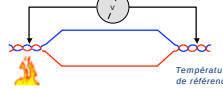
- Un thermocouple est un circuit comprenant deux conducteurs constitués de métaux très dissemblables.
- Ce circuit a deux jonctions : La jonction froide se situant généralement dans le boîtier de l'indicateur et la jonction chaude se trouvant à l'endroit de mesure de température.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Thermomètre à thermocouple :



- Une différence de potentiel et, donc, un courant électrique apparaît de façon autonome entre les jonctions lorsqu'il y a une différence de température entre celles-ci.
- Pour compenser les erreurs liées aux variations de température de la jonction froide, des ajustements doivent être envisagés (bilame dans l'indicateur, usage de thermistances, ...)

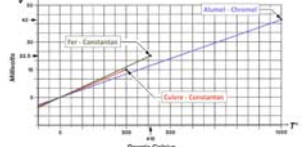
© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Moyens de mesure de températures à bord d'un aéronef

Thermomètre à thermocouple :

- Les métaux qui sont le plus souvent jumelés ensemble sont :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température extérieure de l'air (OAT)

- Sur les petits avions et les hélicoptères, la température extérieure de l'air (OAT-Outside Air Temperature) est mesurée à l'aide d'un thermomètre à bilame hélicoïdal (peu précis) :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température statique de l'air (SAT)

- Il s'agit de la température de l'air immobile (SAT-Static Air Temperature).
- On l'obtient en plaçant la sonde, souvent une résistance ou une thermistance, au centre d'un tourbillon ou légèrement à l'arrière d'un étranglement d'un venturi.
- Mais elle est généralement calculée par une centrale aérodynamique (ADC-Air Data Computer) à partir de la température d'air totale (TAT) et de la vitesse (TAS).

SAT + Augmentation de la T° = TAT

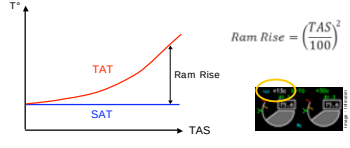
Friction et compressibilité de l'air sur le revêtement de l'aéronef

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température totale de l'air (TAT)

- Comme on l'a vu, il s'agit de la SAT augmentée de la température due au frottement et à la compressibilité de l'air sur le revêtement de l'aéronef (effet Pitot).

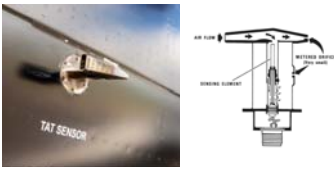


© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température totale de l'air (TAT)

- La température totale de l'air est mesurée par une sonde situé sur le fuselage de l'avion :

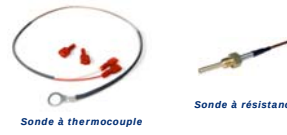


© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température de culasse (CHT)

- La température de culasse (CHT-Cylinder Head Temperature) est mesurée à l'aide d'un thermocouple ou d'un thermomètre à résistance.
- La sonde est toujours placée sur le cylindre le plus chaud.

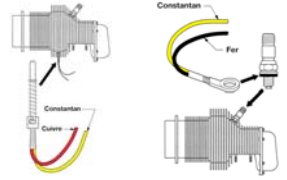


© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température de culasse (CHT)

- Exemple : Deux sondes à thermocouple.

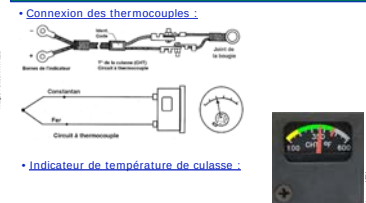


© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température de culasse (CHT)

- Connexion des thermocouples :



- Indicateur de température de culasse :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température d'entrée d'air du carburateur

- La température d'entrée d'air du carburateur (Carb. Temp.) est mesurée à l'aide d'un thermomètre à résistance ou d'un thermocouple.
- La sonde est toujours placée dans l'entrée d'air du moteur, peu avant l'étranglement du venturi du carburateur.

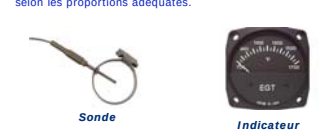


© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température des gaz d'échappement (EGT) - Pistons

- La température des gaz d'échappement (EGT-Exhaust Gas Temperature) est mesurée à l'aide d'un thermocouple installé dans la tubulure de l'échappement à l'aide d'un collier.
- L'EGT permet au pilote d'ajuster son mélange air/essence selon les proportions adéquates.

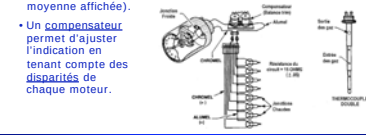


© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température des gaz d'échappement (EGT) - Turbines

- La température des gaz d'échappement (EGT-Exhaust Gas Temperature) sur les moteurs à turbine est mesurée à l'aide de thermocouples doubles installés à la sortie de la chambre à combustion.
- Les thermocouples sont câblés en parallèle (température moyenne affichée).
- Un compensateur permet d'ajuster l'indication en tenant compte des disparités de chaque moteur.

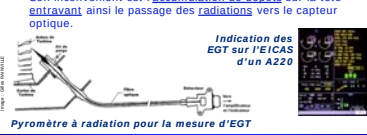


© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température des gaz d'échappement (EGT) - Turbines

- La température des gaz d'échappement peut aussi être mesurée avec un pyromètre à radiation.
- Le pyromètre réagit plus rapidement et l'indication est instantanée.
- Son inconvénient est l'accumulation de dépôts sur la tête entravant ainsi le passage des radiations vers le capteur optique.

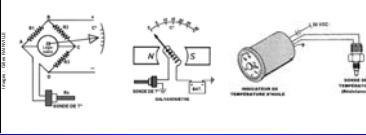


© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température des liquides

- La température des liquides (huile, carburant) est généralement mesurée à l'aide de thermomètres à résistance, la sonde étant noyée dans le liquide.
- La sonde est placée dans un circuit à pont de Wheatstone ou directement à un galvanomètre.

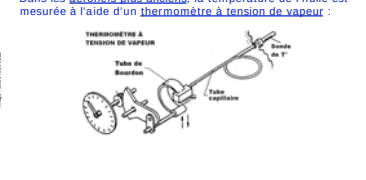


© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de températures

Température des liquides

- Dans les aéronefs plus anciens, la température de l'huile est mesurée à l'aide d'un thermomètre à tension de vapeur :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de pressions

Définition et unités utilisées

- La pression est une force appliquée sur une surface.
- La pression absolue est une pression mesurée par rapport au vide (exemple : pression d'admission sur un moteur à pistons).
- La pression manométrique est mesurée par rapport à la pression atmosphérique ambiante, il s'agit d'une pression relative (exemple : pression d'huile moteur).
- La pression différentielle est une mesure de différence entre deux pressions (exemple : pression différentielle de cabine).



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Mesures de pressions

Définition et unités utilisées

- Les unités de pression :

➤ Livres par pouce carré - Pounds per Square Inch (PSI).
➤ Pouces de mercure - Inches of Mercury (inHg).
➤ Millibars - Millibars (mbar).
➤ Kilopascals - Kilopascals (kPa).

1 bar = 14,504 PSI
 1 bar = 100 kPa
 1 bar = 29,53 inHg
 1 pouce de mercure = 3,3864 kPa

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Aéronautique

Mesures de pressions

Les manomètres à parois déformantes

La capsule anéroïde :

- Capsule étanche réalisée en tôle mince qui contient une pression de référence.
- Utilisée pour les faibles pressions (voir chapitre au sujet des Pitot-statiques).

Le diaphragme :

- Membrane souple ou disque métallique ondulé fixé hermétiquement à un boîtier étanche.
- Utilisé pour la mesure de différences de pressions.
- Très précis, il est utilisé pour les faibles pressions.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Aéronautique

Mesures de pressions

Les manomètres à parois déformantes

Le soufflet :

- Cylindre ou cône formé à l'aide d'une feuille métallique souple et ondulée placé dans un boîtier étanche.
- Dispose éventuellement d'un ressort.
- Il est très précis et est utilisé pour les faibles et moyennes pressions.

Le tube de Bourdon :

- Tube cylindrique creux légèrement aplati formant un demi-cercle qui, sous l'effet de la pression, tend à se redresser.
- Moins précis, il est utilisé pour les moyennes et fortes pressions.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Aéronautique

Mesures de pressions

Les capteurs de pression piézoélectriques (à quartz)

- Un quartz peut fonctionner de deux manières différentes :
 - Soumis à une force mécanique, il va produire une charge électrique (loi de Curie).
 - Soumis à une différence de potentiel, il va osciller mécaniquement à une fréquence très stable (loi de Lippmann).
- Dans les deux situations, la taille (dimensions) du quartz a une influence.
- Dans le cas des capteurs de pression, nous allons utiliser la première des deux propriétés (loi de Curie).
- Les capteurs de pression piézoélectriques sont prévus pour la mesure de pressions dynamiques.
- Ils ont une réponse rapide, sont robustes et peuvent couvrir de vastes gammes de pressions.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Aéronautique

Mesures de pressions

Les capteurs de pression piézoélectriques (à quartz)

- Constitution d'un capteur de pression piézoélectriques :

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Aéronautique

Mesures de pressions

Pressions mesurées à bord des aéronefs

- À bord d'un aéronef, les pressions habituellement mesurées sont les suivantes :
 - Pressions statique et dynamique de l'air : Voir Pitot-statique...
 - Pression d'huile moteur.
 - Pression de carburant.
 - Pressions pneumatiques ou dépressions (Succion)...
 - Pressions d'admission : Sur les moteurs à pistons.
- Souvent, les systèmes de mesure de pressions sont semblables pour l'huile, le carburant et l'hydraulique.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Aéronautique

Mesures de pressions

Pression d'huile des moteurs

- À bord des petits aéronefs, on utilise un tube de Bourdon monté dans le boîtier de l'instrument.
- On utilise un fluide incompressible intermédiaire afin de ne pas drainer l'huile du moteur en cas de rupture du capillaire.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Aéronautique

Mesures de pressions

Pression d'huile des moteurs

- À bord des gros aéronefs, les tubes de Bourdon sont montés directement sur le moteur.
- La liaison avec l'instrument dans le cockpit s'effectue avec un synchro transmetteur.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Aéronautique

Mesures de pressions

Pression d'huile des moteurs

- Sur les aéronefs modernes, on utilise des capteurs de pression piézoélectriques :
- Il existe aussi des capteurs de pression résistifs.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale Aéronautique

Mesures de pressions

Pression d'admission (Manifold Pressure)

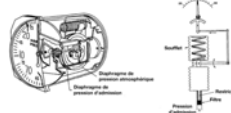
- La pression d'admission (MP ou MAP) est la pression absolue régnant dans la conduite d'admission d'air d'un moteur à pistons.
- Son unité est le pouce de mercure.
- C'est la pression qui force le mélange air-essence dans les cylindres en vue de l'explosion.
- Au plus la pression est élevée, au plus la puissance développée par le moteur est grande.
- L'indication de pression d'admission permet d'ajuster la puissance du moteur.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Mesures de pressions

Pression d'admission (Manifold Pressure)



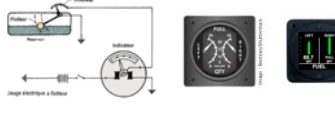
- L'instrument est muni d'un diaphragme ou d'un soufflet compensateur permettant de compenser la diminution de pression atmosphérique en fonction de l'altitude.
- Ceci permet au pilote de conserver une même référence comme s'il était au niveau du sol.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

La jauge à flotteur



- La jauge à flotteur est très simple.
- Un flotteur placé dans le réservoir actionne un rhéostat (résistance variable).
- Celui-ci est placé dans un circuit électrique à courant continu avec un indicateur (un logomètre à l'origine).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

La jauge capacitive



Jauges et compensateurs dans un A320

Principe de fonctionnement

- La jauge capacitive ne comporte aucune pièce mobile.
- Elle utilise les propriétés diélectriques de l'air et du carburant.
- La capacité (unité : farad) varie avec la quantité de carburant présente entre les deux tubes concentriques (plaques).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

La jauge capacitive

- Le volume de carburant varie de façon significative avec la température.
- Si la température augmente, le volume augmente sans, toutefois, donner de l'énergie thermique supplémentaire.
- La constante diélectrique K varie aussi avec la température :

$$C = \frac{K \cdot A}{d}$$

C = capacité (farad)
 K = constante diélectrique (farad/mètre)
 A = surface des plaques (mètres²)
 d = distance entre les plaques

- Si la température augmente, la constante diélectrique diminue.
- Enfin, l'énergie thermique contenue dans un volume donné varie selon le type de carburant : JET A, JET A-1, JET B, JP4, etc.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

La jauge capacitive



- Un compensateur est monté dans le circuit électrique.
- Il est placé au niveau le plus bas du réservoir pour être toujours recouvert de carburant.
- Il compense la variation de la constante diélectrique K du carburant causées par la variation de la température.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

La jauge capacitive



- Un densimètre électronique permet de compenser la variation de densité du carburant en fonction de sa température.
- Le calculateur de quantité de carburant compile les informations des jauges capacitatives, des compensateurs et des densimètres pour déterminer la quantité précise de carburant ainsi que sa température.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

Affichage de la quantité de carburant

- Sur l'écran EICAS ou ECAM :



Partie de l'écran « Fuel » de l'EICAS du Dornier 328

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

Affichage de la quantité de carburant

- Sur des écrans multifonctions :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

Affichage de la quantité de carburant

- Parfois, la quantité de carburant est affichée sur le panneau d'alimentation de l'aéronef.
- Dans ce cas, il est connecté au calculateur de carburant :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

Autres moyens de mesure de quantité de fluides

- Parfois, c'est assez simple :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les jauges de quantité

Autres moyens de mesure de quantité de fluides

- Il existe aussi des systèmes de mesure de quantité de fluides fonctionnant de manière électro-optique.
- Ils utilisent simplement la lumière pour déterminer un niveau de fluide dans un réservoir.
- Ils sont autonomes et n'ont aucun contact avec le fluide mesuré.



© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

- Les tachymètres servent à mesurer des vitesse de rotation (moteurs, APU, rotor, etc.)
- Les vitesses de rotation s'expriment en tours par minute (RPM - Revolutions Per Minute) ou en pourcentage.
- Plusieurs technologies de tachymètres existent.

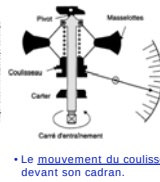


© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

Le tachymètre centrifuge



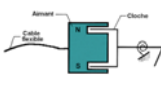
- L'arbre du tachymètre est entraîné par un câble mécanique flexible.
- Deux masselottes attachées à des biellettes s'écartent en fonction de la force centrifuge et donc de la vitesse de rotation de l'arbre.
- Par les biellettes, les masselottes font monter ou descendre le coulisseau en fonction de la vitesse.
- Le mouvement du coulisseau fait bouger l'aiguille du tachymètre devant son cadran.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

Le tachymètre magnétique



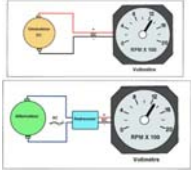
- Un aimant permanent est entraîné par un câble mécanique flexible.
- L'aimant tourne dans une cloche métallique non ferreuse et y induit un courant de Foucault.
- Ce courant de Foucault est donc fonction de la vitesse de rotation de la cloche.
- La cloche est mécaniquement liée à l'aiguille du tachymètre, mais, en tournant, elle s'oppose à la réaction d'un ressort calibré antagoniste.
- La déviations de l'aiguille indique dès lors la vitesse de rotation.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

Les tachymètres électriques simples



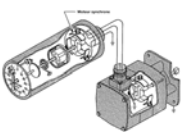
- Les tachymètres électriques simples sont, en fait, des voltmètres DC.
- La tension appliquée à leurs bornes est proportionnelle à la vitesse de rotation appliquée, soit à la génératrice DC (dynamo) ou à l'alternateur.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

La génératrice tachymétrique



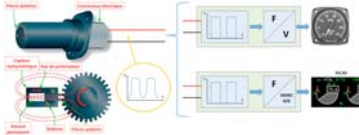
- Il s'agit d'un alternateur triphasé dont le rotor est un aimant permanent entraîné par l'arbre en rotation.
- La fréquence de la tension produite dépend de la vitesse de rotation de l'arbre.
- L'instrument est constitué d'un moteur triphasé synchrone.
- L'axe du moteur triphasé synchrone est lié à un tachymètre magnétique, qui indique la vitesse de rotation de l'arbre.
- Ce système, entièrement autonome, est utilisé pour transmettre à distance des informations de vitesses de rotation.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

Le tachymètre électronique



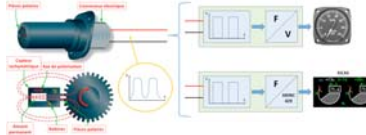
- Le principe est basé sur la fermeture d'un circuit magnétique par une roue dentée passant devant des pièces polaires.
- La roue dentée est entraînée par l'arbre dont on veut mesurer la vitesse de rotation.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

Le tachymètre électronique



- Grâce à l'aimant permanent, le passage successif des dents devant le capteur magnétique crée un flux magnétique à chaque fois qu'une dent est alignée avec les pièces polaires.
- Une tension faite d'impulsions est donc générée à la sortie du capteur magnétique.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

Le tachymètre électronique

- Les impulsions sont ensuite « rectifiées » pour entrer dans un convertisseur fréquence/tension qui alimente ensuite l'indicateur.
- Une alternative consiste à générer, par exemple, un code ARINC 429 qui sera, notamment, affiché sur un EICAS ou un ECAM.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

Le tachymètre électronique

- Des variantes basées sur le même principe peuvent être implantées à différents endroits sur un moteur ou une boîte de transmission.
- L'avantage de ce système est qu'il ne nécessite aucune liaison mécanique entre le capteur et l'indicateur ou l'affichage.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

Le tachymètre électronique

- Maintenance des tachymètres :**

Norme 625 Appendice C: Tâches hors calendrier et exigences relatives à la maintenance de l'équipement - Règlement de l'aviation canadien (RAC)

A. Tachymètres

Dans le cas des avions à hélice et à voilure fixe, la précision des tachymètres mécaniques régit « l'échelle de tachymètre » doit être vérifiée sur place annuellement. Lorsque des limites ont été établies par le constructeur de l'avion, la précision de ce type de tachymètre doit se situer à l'intérieur de ces limites. Dans le cas où aucune limite n'a été établie par le constructeur de l'avion, la précision de ces tachymètres doit se situer à l'intérieur de $\pm 1\%$ du nombre de tours/motus du moteur à un point du régime de croisière.

(Inspection 2000/1-2001)

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Les tachymètres

Les tachymètres d'hélicoptères

- Les tachymètres d'hélicoptères affichent simultanément la vitesse de rotation du ou des moteurs ainsi que celles du rotor principal.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Le synchroscope

- Le synchroscope permet de synchroniser les vitesse de rotation des moteurs d'un avion.
- Le but est d'éviter les batttements de fréquences sonores, notamment les basses fréquences, qui peuvent être dangereuses pour la structure de l'avion.
- Deux familles de synchroscopes existent.
- Soit une aiguille tournant dans un sens ou dans l'autre indique d'augmenter ou de diminuer quelque peu la vitesse de rotation des moteurs #2, #3 ou #4 par rapport au moteur #1.
- Soit il s'agit d'un petit disque blanc et noir fonctionnant de la même manière.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Le synchroscope

- Une génératrice triphasée à aimant permanent est montée sur chaque moteur.
- Le signal de la génératrice du moteur #1 est pris comme référence et alimente les trois bobines du rotor du synchroscope.
- Le signal de la génératrice du moteur #2 alimente les trois bobines du stator du synchroscope.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Le synchroscope

- Ces alimentations triphasées créent un champ magnétique tournant dans le stator ainsi que dans le rotor.
- Si les moteurs tournent à la même vitesse, il en va de même pour les champs magnétiques et, dès lors, le rotor est immobile.
- Dans ce cas, l'aiguille ne bouge pas.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Le synchroscope

- Si le moteur #2 tourne plus vite que le moteur #1, les deux champs magnétiques tentent de s'aligner entraînant le rotor et l'aiguille dans le sens horaire du côté « Fast ».
- Si le moteur #2 tourne moins vite que le moteur #1, les deux champs magnétiques tentent toujours de s'aligner; mais, cette fois-ci, ils entraînent le rotor et l'aiguille dans le sens antihoraire du côté « Slow ».

© Département d'avionique Document à des fins de formation

ENNA École Nationale d'Avionique

Le synchroscope

- L'indication « Fast (mouvement horaire)/Slow (mouvement antihoraire) » informe donc le pilote de la vitesse du moteur #2 par rapport au moteur #1.
- S'il y a plus que deux moteurs, la vitesse de rotation des #3 et #4 sera également comparée à celle du moteur #1.
- Dans le cas du disque blanc et noir, le fonctionnement est identique. On regarde si le mouvement est horaire ou antihoraire pour ajuster la vitesse des moteurs.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les débitmètres



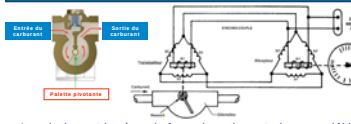
- Le débit représente le passage d'un volume de liquide par unité de temps.
- On parle ainsi de litres/heure ou de gallons/heure ou, encore, de kilogrammes/heure ou de livres/heure.
- Dans les aéronefs, les débitmètres servent à indiquer la consommation de carburant à l'équipage.
- Connaissant la quantité de carburant disponible dans les réservoirs de l'appareil et en lisant la valeur de la consommation sur le débitmètre, l'équipage va être en mesure de déterminer l'autonomie (endurance), ou le temps de vol restant avant de tomber en panne.

On n'y arrivera pas !!!

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les débitmètres

Le débitmètre volumétrique

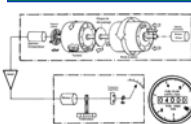


- Le principe est basé sur la force du carburant, donc son débit, exercée sur une palette mobile maintenue par un ressort de rappel calibré.
- Le déplacement de la palette est retransmis sur l'indicateur par un synchro-répétiteur.
- Ce système est assez ancien et peu précis.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les débitmètres

Le débitmètre massique

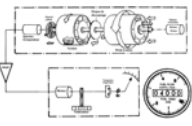


- Le carburant passe dans un système de roue à aubes, puis dans une turbine.
- La roue à aube est entraînée par un moteur tournant à la vitesse constante de 60 RPM.
- L'axe de la turbine est retenu par un ressort calibré.
- Le carburant en passant dans la roue à aubes, est animé d'une accélération tangentielle.
- L'énergie résultant de ce mouvement de rotation est fonction du débit massique.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les débitmètres

Le débitmètre massique



- Le carburant passe dans un système de roue à aubes, puis dans une turbine.
- La roue à aube est entraînée par un moteur tournant à la vitesse constante de 60 RPM.
- L'axe de la turbine est retenu par un ressort calibré.
- Cette énergie s'applique sur la turbine et s'oppose à la résistance du ressort calibré.
- Le mouvement de la turbine est donc fonction du débit massique.
- Un synchrotransmetteur envoie l'information de débit massique sur un cadran dans le cockpit.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les débitmètres

Les systèmes de débitmètres en aviation générale



Mesure du débit par effet Hall Adaptateur / interface Indicateur

- Il existe des systèmes de débitmètres légers et compacts fonctionnant aussi bien sur des aéronefs à moteurs à pistons qu'à turbomoteurs.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les débitmètres

Les capteurs électro-optiques



- Les capteurs électro-optiques fonctionnent avec les différentes sortes de carburant (AVGAS, JET A, JET A-1, etc.)
- Du fait de leur très faible facteur de charge, ils peuvent être utilisés dans les circuits de carburant fonctionnant par gravité.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les débitmètres

Les systèmes d'affichage de débit de carburant



- Plusieurs sortes de systèmes d'affichage de débit de carburant existent, notamment pour l'aviation générale.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les débitmètres

- L'information provenant des débitmètres permet à l'équipage d'évaluer la consommation de carburant et d'en tenir compte lors de la navigation.

Sinon, c'est la panne sèche ...




CDU-Control & Display Unit du FMS-Flight Management System

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les couplemètres



- Un couple est le produit d'une force par une distance.
- Il s'exprime en Newton-mètres (Nm), mais, en aviation, on parlera plus volontiers de pieds livres (Ft/Lb).
- Les couplemètres vont donc afficher une valeur en Ft/Lb ou, plus simplement, en pourcentage du couple maximum permis.
- Certains couplemètres ont une indication de pression en PSI relative au principe de mesure du couple.
- Le couple se mesure sur l'arbre de l'hélice ou de la BTP.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les couplemètres

- Sur les moteurs où la **boîte de réduction** est **satellitaire**, le **couple moteur** est appliqué sur une **couronne** maintenue par **deux pistons**.
- Une **pompe à huile** dédiée au couplemètre envoie de l'**huile** dans les deux **pistons** munis d'**orifices de fuites variables**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les couplemètres

- Au plus le couple est **élevé**, au plus les pistons **s'enfoncent** dans les cylindres et **réduisent** la section des **orifices de fuites**.
- La **pression** emprisonnée dans les **cylindres** augmente donc avec le **couple**.
- Cette **pression** est ensuite envoyée à l'**indicateur**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les couplemètres

Le couplemètre à tube de torsion

- L'**arbre de liaison** entre la turbine et la boîte de réduction est un **tube de torsion**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les couplemètres

Le couplemètre à tube de torsion

- Le **tube de torsion** (rouge, engrenage A) est situé à l' de l'**arbre de référence extérieur** (bleu, engrenage B).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les couplemètres

Le couplemètre à tube de torsion

- Chaque **engrenage** est surmonté d'un **capteur magnétique**.
- En cas d'application d'un **couple**, un **déphasage** (ϕ) apparaît entre les deux engrenages.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les couplemètres

Le couplemètre à tube de torsion

- Ce **déphasage** entre les **impulsions** générées par les capteurs magnétiques A et B est représentatif du **couple appliqué**.
- Un **circuit électronique** le convertit en **indication de couple**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les indicateurs de poussée

- La **poussée** d'un turboréacteur peut être exprimée par le **rapport de pressions** existant à la **sortie** du moteur par comparaison avec celle existant à l'**entrée** de celui-ci.
- Ce **rapport** est connu sous l'acronyme « **EPR-Engine Power Ratio** ».
- Sur les réacteurs à **double flux à haut taux de dilution** (Hi Bypass Ratio Jet Engines) où une grande partie de la poussée est produite par la soufflante (70% et plus), l'indication de **N1** permet d'estimer la **poussée**.
- Dans ce cas, certains fabricants n'installent pas d'indicateur EPR.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les indicateurs de poussée

- L'EPR est déterminé par un **calculateur** qui effectue le rapport des **mesures** de la pression totale à la **sortie** du moteur (P_t dans l'exemple) par rapport à la pression d'**entrée** (P_t dans l'exemple).
- Le **résultat** du rapport des mesures est envoyé à l'**indicateur EPR** ou à l'**EICAS**.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les indicateurs de poussée

- Souvent, plutôt que de prendre la pression totale à l'**entrée du moteur**, on utilisera celle prélevée par la **prise Pitot**.
- Certains avions sont équipés d'un **indicateur de limite d'EPR** selon le **mode** choisi par le pilote:

Press (Pitot) → ADC - Centrale aérodynamique → Ordinateur calculateur de performances → Limites EPR: Maximum continu, Décollage, Montée, Croisière.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures de vibrations

Le détecteur de vibrations à aimant permanent

- Un moteur en fonctionnement n'est pas exempt de vibrations.
- Rendues à un certain niveau, les vibrations peuvent provoquer des dégâts, éventuellement très importants.
- Il est donc opportun de contrôler les niveaux vibratoires des moteurs.

Un système de détection de niveau de vibrations bien simple consiste à placer un aimant permanent dans une bobine.

- L'aimant, soutenu par deux ressorts, va créer un courant électrique dans la bobine d'autant plus élevé que l'amplitude des vibrations est importante.
- Le niveau vibratoire est ensuite affiché sur un indicateur.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures de vibrations

Le détecteur de vibrations piézoélectrique



- Actuellement, la majorité des capteurs de vibrations sont des accéléromètres de type piézoélectriques (à quartz).
- Dans ce cas, une masse soumise aux vibrations exerce une pression sur un quartz qui génère ainsi une charge électrique qui est fonction de l'amplitude des vibrations (loi de Curie).
- Le signal électrique est ensuite traité pour être affiché sur un indicateur.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures de vibrations

Implantation des détecteurs sur un moteur



- Les réacteurs sont généralement équipés de deux capteurs de vibrations.
- Le premier est habituellement monté sur le carter d'entrée d'air du moteur tandis que l'autre se situe à l'arrière au niveau de la turbine.
- Un filtre permet de séparer les basses fréquences (N1) des hautes fréquences (N2).
- On peut également sélectionner le capteur avant, le capteur arrière ou les deux.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures de vibrations

Les détecteurs de vibrations utilisés en maintenance

- Des capteurs de vibrations piézoélectriques sont régulièrement utilisés en maintenance lors d'essais au sol :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures d'angles d'attaque

L'angle d'attaque et son importance



- L'angle d'attaque (AOA - Angle of Attack) est l'angle entre la direction du vent relatif et l'axe longitudinal de l'avion.
- L'angle d'attaque est en lien avec la portance des ailes.
- Si l'angle d'attaque est trop important, il y a décrochage de la couche critique sur le profil de l'aile et décrochage.
- La connaissance de l'angle d'attaque et sa valeur limite, compte-tenu des conditions présentes de vol, sont donc capitales afin de garantir un vol en toute sécurité.
- L'angle de décrochage dépend du profil aérodynamique de l'aile et varie, donc, d'un avion à l'autre.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures d'angles d'attaque

Les composants pour la mesure de l'angle d'attaque

Les capteurs :

- Transmetteur à girouette AOA Vane
- Transmetteur à tube à fentes AOA Slotted Probe

Les indicateurs :

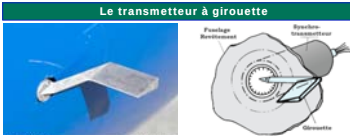
- Analogiques
- Lumineux



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures d'angles d'attaque

Le transmetteur à girouette

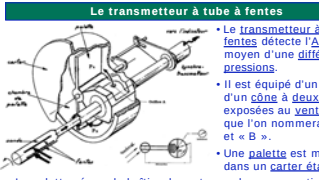


- Le transmetteur à girouette est constitué d'une palette qui s'oriente selon le vent relatif.
- La palette est reliée au rotor d'un synchrotransmetteur qui retransmet l'AOA aux unités et instruments concernés.
- La palette est protégée contre le givre pouvant se former en vol grâce à une résistance chauffante.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures d'angles d'attaque

Le transmetteur à tube à fentes

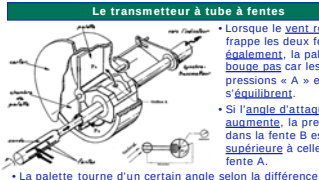


- Le transmetteur à tube à fentes détecte l'AOA au moyen d'une différence de pressions.
- Il est équipé d'un tube ou d'un cône à deux fentes exposées au vent relatif que l'on nommera « A » et « B ».
- Une palette est montée dans un carter étanche.
- La palette sépare le boîtier du carter en deux compartiments étanches (« A » au-dessus et « B » en dessous).
- La palette entraîne aussi le rotor d'un synchrotransmetteur.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures d'angles d'attaque

Le transmetteur à tube à fentes



- Lorsque le vent relatif frappe les deux fentes également, la palette ne bouge pas car les pressions « A » et « B » s'équilibrent.
- Si l'angle d'attaque augmente, la pression dans la fente B est supérieure à celle dans la fente A.
- La palette tourne d'un certain angle selon la différence de pressions et transmet la valeur de cet angle à l'indicateur.
- Un mécanisme de rétroaction ramène la palette à la position neutre, prête pour la prochaine variation de pression.

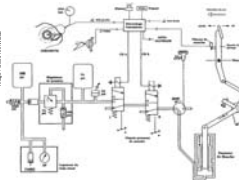
© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures d'angles d'attaque

Les protections contre le décrochage

Sur les gros avions :

- La détection de l'angle d'attaque fait partie d'un système complexe.
- La protection contre le décrochage comprend un vibreur de manche, une alarme sonore et un voyant lumineux.



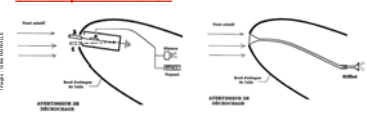
© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures d'angles d'attaque

Les protections contre le décrochage

Sur les petits avions :

- Sur les petits avions, on trouve essentiellement deux systèmes d'avertissement de décrochage : l'avertisseur à palette (à gauche) et l'avertisseur à sifflet (à droite).



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Les mesures d'angles d'attaque

Étude de cas : Boeing 737 MAX



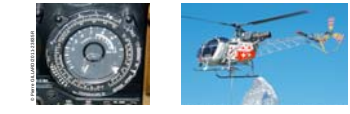
- Le capteur d'angle d'attaque a été un maillon principal de la chaîne d'événements ayant mené aux accidents du Boeing 737 MAX dû au MCAS-Maneuvering Characteristics Augmentation System.

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Instruments particuliers

Indicateur de pas collectif

- Sur les anciens hélicoptères de l'Aérospatiale (maintenant Airbus Helicopters) équipés de turbomoteurs à turbine liée Arrouste et Astazou, on trouve un indicateur de pas général :

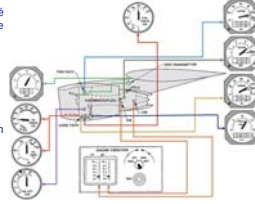


- Il n'y a donc pas d'indicateur de couple, mais bien de température T4 (équivalente à la TOT).

© Département d'avionique Document à des fins de formation

Conclusions

- Avec ce qui a été présenté dans ce cours, nous sommes maintenant en mesure de comprendre le fonctionnement de tous les instruments d'un moteur d'avion :



© Département d'avionique Document à des fins de formation

Conclusions

Exemples récapitulatifs



© Département d'avionique Document à des fins de formation



Merci de votre attention

© Département d'avionique Document à des fins de formation