



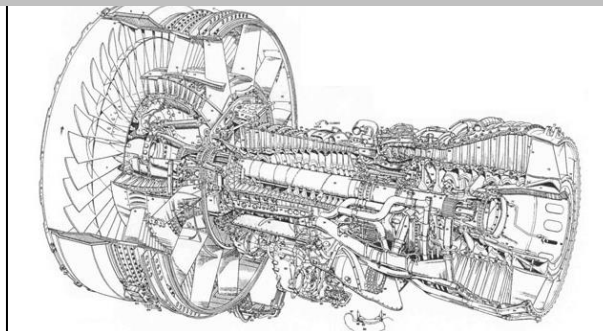
Cours de technologie

FORMATION AERONAUTIQUE

GROUPES PROPULSEURS TURBOMACHINES

SURVEILLANCE ET CONDUITE FADEC

- REGIMES N1, N2, N3 → SURVITESSE (OVERSPEED)
- TEMPERATURE E.G.T. → FLUAGE (CREEP)
- PRESSIONS E.P.R. → POMPAGE (STALL)



Définition et rôle DU FADEC

Le système **FADEC**,

acronyme anglais de **Full Authority Digital Engine Control**, est un système qui s'interface entre le cockpit et le moteur d'aéronef.

C'est un système de régulation numérique centré sur un calculateur à deux voies symétriques, redondantes et à pleine autorité. Les capteurs principaux et les actionneurs sont pour leur partie électrique dupliqués (un par voie). Seuls les organes hydrauliques (pompes, servovannes, générateurs de pression) sont uniques (non redondants).

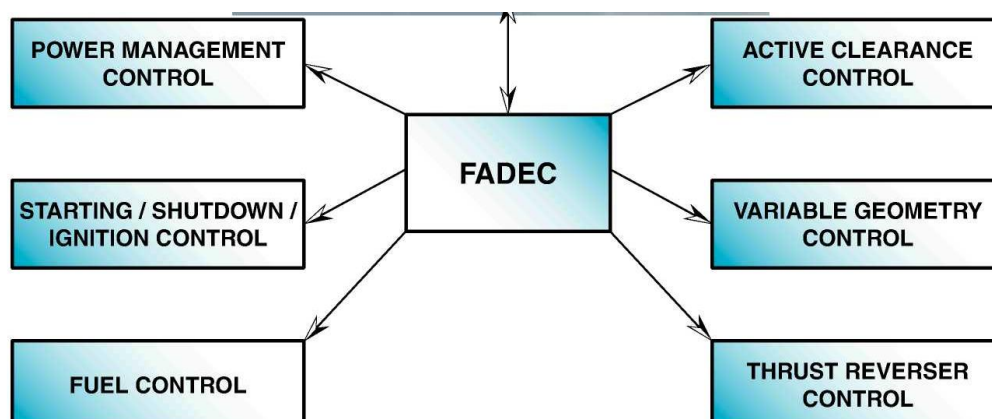
Il assure avec une totale autorité les fonctions de :

1. régulation de débit (alimentation en carburant, contrôle des accélérations/décélérations)
2. démarrage automatique
3. transmission des paramètres moteurs aux instruments du cockpit
4. gestion de la poussée et protection des limites opérationnelles
5. gestion de la poussée inverse

Cette autorité est supérieure à celle des pilotes et à pour vocation de toujours maintenir le moteur et les conditions de vol au niveau de sécurité le plus élevé.

Il prend totalement en charge le contrôle des systèmes moteurs en fonction des consignes données par le pilote. Il remonte les informations pour les indications de pilotage, pour la surveillance du moteur, pour les rapports de maintenance et le dépannage.

- Il fournit le carburant nécessaire et assure les protections aux limites N1 et N2.
- Il commande les paramètres du moteur durant la séquence de démarrage.
- Il contrôle la puissance selon 2 modes: en manuel et en commande automatique de poussée.
- Il assure un fonctionnement optimal du moteur en contrôlant le flux d'air du compresseur et celui d'éjection de la turbine.



Le cerveau électronique du FADEC est l'ECU (Engine Control Unit) qui assure toutes les fonctions de logique et de calcul à proximité du moteur.
Cet ECU est en relation numérique avec les ordinateurs de bord.

Il comporte deux voies totalement indépendantes A et B. La quasi totalité des capteurs (pressions, températures, débits carburants, positions des vannes et moteurs de couple, lignes ARINC avec les autres calculateurs) sont doublés ; un pour la voie A et un pour la voie B.

Chaque partie comprend sa propre alimentation électrique dont la puissance primaire provient du 28VDC (exemple sur CFM56-5A/B) ou du 115v 400hz (CFM56-5C) de bord. Lorsque le régime moteur N1 atteint environ 15%, le relais de puissance primaire est passé à l'alternateur N2 triphasé à tension et fréquence variable et le réacteur assure lui-même l'énergie électrique nécessaire à son fonctionnement.

Le FADEC assure les fonctions suivantes :

- CONTROLE REACTEUR

Contrôle du débit carburant,
Régulation des accélérations et des décélérations,
Régulation des Variable Bleed Valves (VBV) et des Variable Stator Vanes (VSV),
Contrôle des jeux de turbine (HPTCC et LPTCC → jeux entre aubes de turbines et carters)
Sélection du ralenti (IDLE).

- PROTECTIONS

Survitesse N1 et N2. (éventuellement N3 sur triple corps)
Surveillance de la température et du fluage des étages turbines, acquisition mesures EGT.
Surveillance pompage par le principe E.P.R. (Engine Pressure Ratio)

- GESTION DE LA POUSSEE

Contrôle automatique de la poussée,
Calcul des limites des paramètres de poussée,
Gestion manuelle de la poussée en fonction de la position des manettes de poussée (TLA, Throttle Level Angle),
Gestion automatique de la poussée (demande A/THR).

- SEQUENCE AUTOMATIQUE DE DEMARRAGE

Commande :
de la vanne de démarrage (ON / OFF),
du robinet HP carburant,
du débit carburant,
de l'allumage (ON / OFF).
Surveillance du N1, N2, FF et de l'EGT.
Arrêt et ré-initialisation de la séquence (au sol uniquement).

- SEQUENCE MANUELLE DE DEMARRAGE

Surveillance passive du réacteur
Commande :
de la vanne de démarrage,
du robinet HP carburant, de l'allumage.

- COMMANDE DE L'INVERSION DE POUSSEE

Manoeuvre des volets déviateurs de poussée.
Réglage de la poussée en inversion.

- COMMANDE DE LA RECIRCULATION CARBURANT

Recirculation carburant vers les réservoirs en fonction de la température de l'huile réacteur, de la configuration du système carburant et de la phase de vol.

- TRANSMISSION ET SURVEILLANCE DES PARAMETRES POUR LES INDICATIONS AU POSTE DE PILOTAGE

des principaux paramètres réacteur,
de l'état du système de démarrage,
de l'état du système d'inversion de poussée,
de l'état du FADEC.

- DETECTION, ISOLEMENT ET ENREGISTREMENT DES PANNES**- REFROIDISSEMENT ECU****Remarque importante :**

Les performances d'un avion sont directement liées aux **caractéristiques du moteur** et en particulier à la poussée et à la consommation. Il est donc indispensable de disposer d'indications sur ces deux paramètres. Néanmoins, d'autres paramètres sont à surveiller pour s'assurer du bon fonctionnement du moteur. Celui-ci doit fonctionner à l'intérieur de **limites fixées** par le constructeur. On peut donc dire que les deux premiers paramètres (poussée, consommation) servent à la conduite du vol d'où leur appellation **PARAMETRES DE CONDUITE MOTEUR** ; Tandis que les autres servent au contrôle du bon fonctionnement d'où leur dénomination de **PARAMETRES DE CONTROLE**.

Cette répartition des mesures, en deux groupes, **CONDUITE**, **CONTROLE**, peut paraître judicieuse mais se heurte en pratique à des difficultés de classement du fait de la diversité des moteurs. En effet, sur une famille de moteurs, la vitesse de rotation du **fan (N1)** sera considérée représentative de la poussée et le rapport de pression (**E.P.R.**) sera utilisé comme élément de contrôle de fonctionnement, et l'on trouvera sur une autre famille l'utilisation inverse de ces mesures.

Exemple :

Le B.747 est équipé de réacteurs type JT9.D. ou CF6.50.

La conduite du JT9 se fait en E.P.R.

La conduite du CF6 se fait en N1.

Cette classification est vraie pour les réacteurs. En ce qui concerne les turbopropulseurs équipant les avions à hélices, par exemple l'ATR 42, on remplacera la notion de poussée par traction. Ainsi, on s'intéressera plus particulièrement au **COUPLE** sur l'arbre moteur.

Remarque :

Le paramètre de conduite peut aussi servir de paramètre de contrôle. Il est évident que les mesures de pression, mesures de vitesse de rotation, **mesures de température** doivent constituer un ensemble cohérent avec, en finalité, une poussée. Les constructeurs réalisent un choix pour afficher une indication sur la poussée à l'aide de l'une de ces mesures.

CONDUITE : REGIMES N1, N2, N3

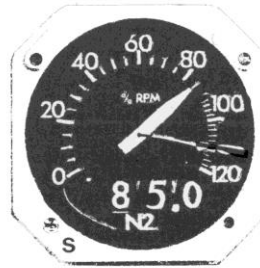
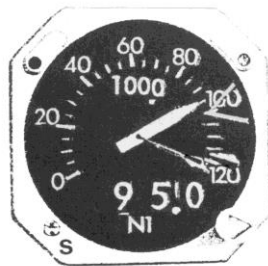
→ SURVITESSE (OVERSPEED)

Tachymétrie :

Le contrôle des vitesses de rotation est également un paramètre important en utilisation des moteurs soit pour vérifier un bon fonctionnement du moteur (N2), soit pour la conduite du moteur (N1), soit pour les deux à la fois. La chaîne tachymétrique est toujours constituée par un générateur qui fournira un signal électrique de grandeur proportionnelle à la vitesse. Ce signal est reçu par un récepteur qui indiquera le nombre de tours. Il existe là aussi plusieurs capteurs et récepteurs.

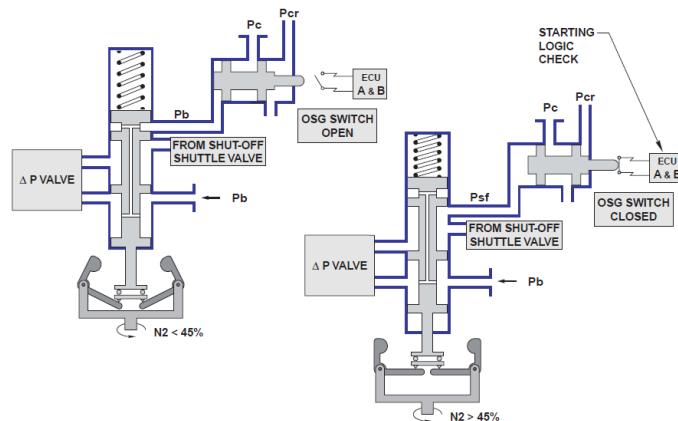
Sur les machines triple corps le corps HP sera associé au tachymètre N3.

à aiguilles



ECAM

La limitation de la survitesse est assurée par des régulateurs à masselottes capables de réduire ou de couper le débit carburant. Une Shut-off valve est également capable de fermer le circuit carburant pour une mise en sécurité ou simplement un arrêt moteur. Il est à noter que la pompe fuel couplée à la gearbox accompagnera la montée en régime du N2 sans être capable à elle seule de réduire le débit.



OVERSPEED GOVERNOR

Aujourd'hui, une multitude de paramètres dont l'acquisition est assurée par des capteurs de toutes sortes (pitots pressions statiques et pressions totales, couplemètres, thermocouples, tachymètres, jauges de contraintes, etc...) permet au FADEC et aux algorithmes associés d'effectuer une surveillance et une conduite des moteurs qui soit tout à fait complète.

Dans le cas d'une conduite au Régime, il s'agit simplement de programmer le FADEC pour mettre des priorités sur la surveillance de la survitesse.

Ceci dans le but de:

- 1- Contrôler la poussée en fonction du régime
- 2- Maîtriser les conditions soniques en bout de pale par un maintien du régime sous les conditions limites.
- 3- Protéger les roulements et les conditions de lubrification, ce qui contribue à préserver les paliers.
- 4- Maintenir les accessoires et les transmissions de la Gearbox aux régimes acceptables.

CONDUITE :TEMPERATURE E.G.T. → FLUAGE (CREEP)

Température turbine :

Le contrôle de la température turbine (**E.G.T.**) est une fonction importante dans l'utilisation des moteurs. On sait que le fluage des aubes turbines est d'autant plus important que la température est élevée. Le jeu entre les extrémités de pales turbine et le carter étant faible, tout dépassement de température se traduira par un accroissement du fluage ce qui réduira le temps d'utilisation de la turbine et augmentera les coûts de maintenance. Pour mesurer la température, les constructeurs disposent une série de thermocouples (généralement chromel-alumel), soit dans le plan inter-turbines, soit après les turbines. Il est évident que pour un même moteur les valeurs de températures varieront avec l'emplacement du plan de sondes, puisque l'on sera dans des gaz plus ou moins détendus. Il y a également, dans un même plan de sondes, des variations de température liées à la profondeur du thermocouple au sein de la veine gazeuse. La température la plus intéressante à mesurer est celle des gaz à la sortie des chambres de combustion, mais cela n'est jamais réalisé à cause des problèmes de tenue des thermocouples aux températures élevées. Les thermocouples fournissent un signal électrique continu de l'ordre du millivolt qui est envoyé à l'indicateur (en général 40 microvolt par degré).

Exemple : le CFM 56 est équipé de neuf sondes thermocouples situés sur le carter de turbine BP. EGT max = 890 °C

Indicateurs: Indicateurs à aiguilles

Indicateurs à aiguilles (figure 2) : La face avant de l'indicateur comporte, entre autres indications, un voyant d'alarme ambre placé dans le coin inférieur droit. Ce voyant d'alarme est répété par un voyant ambre "ENG. EGT" au Master Warning System (système d'alarme principal). Indicateurs: ECAM

ECAM (figure 3) : Pour la famille des avions Airbus, les informations numériques sont données sur un écran.

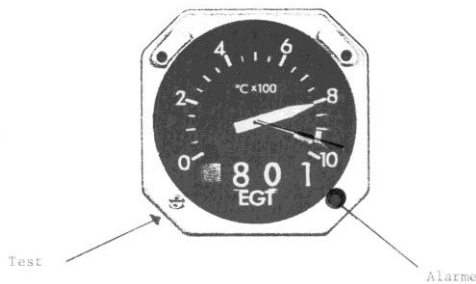


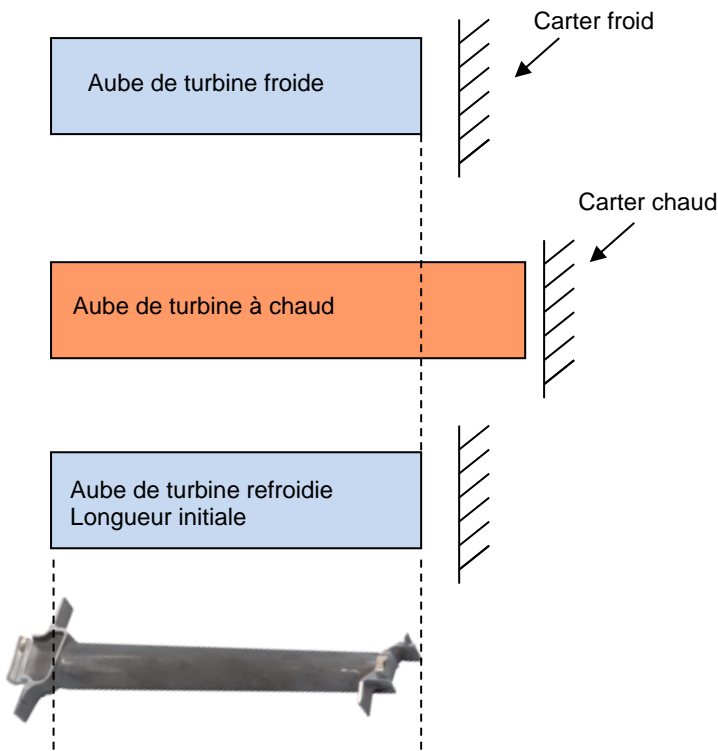
Figure 1



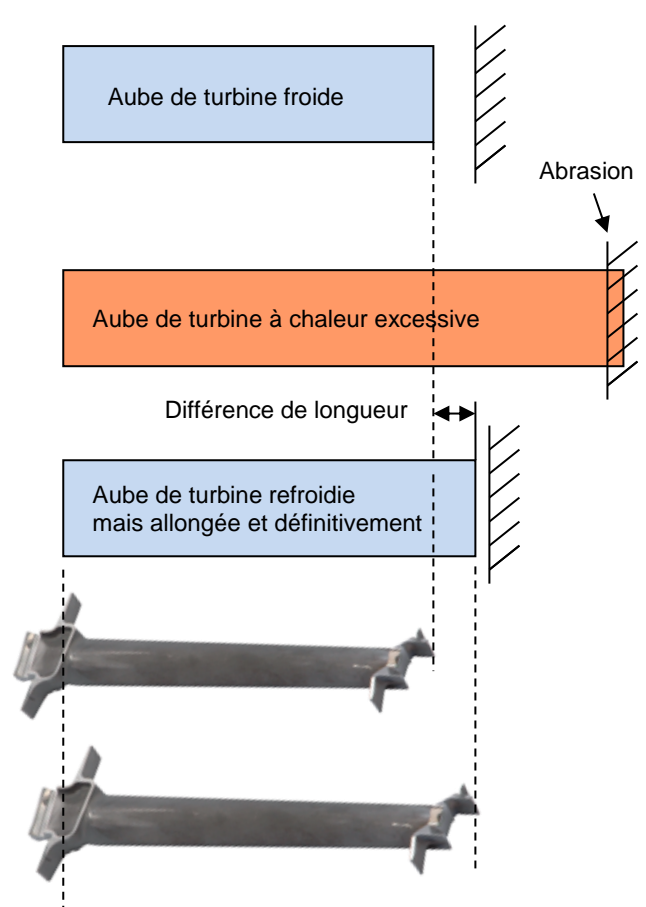
Figure 2

Principe du fluage et de la régulation des systèmes « Cooling Frame Turbine » également désignés par les sigles HPTCC et LPTCC

Fluage élastique :
Pas d'altération du potentiel moteur



Fluage plastique :
Altération du potentiel moteur



Il est important de retenir que :

-Le fluage élastique doit être privilégié à chaque fois que cela est possible. Cela permet de préserver le potentiel des machines et d'économiser sur les budgets de maintenance. Cela correspond généralement à des niveaux de puissance « maxi continu » soit du 100% maxi en utilisation non limitée et donc sans enregistrement des temps chronométrés. Le seul comptage étant fait habituellement en « heures de vol »

-Le fluage plastique correspond à des déformations irréversibles et qui altèrent le potentiel des machines, augmentant la fréquence et le budget des interventions de maintenance. Le domaine d'emploi des moteurs est ainsi maintenu entre 100% et 115% et est limité à quelques minutes en continu avec des temps enregistrés par le FADEC afin d'estimer et de gérer la perte de potentiel. Ceci affecte directement la valeur marchande d'une machine sur le marché de l'occasion et rend parfois invendable un moteur faute de potentiel suffisant.

-Il est possible de préserver le potentiel durablement en « surmotorisant » un avion et en effectuant un TARAGE de la machine (par une reprogrammation du FADEC soft). Ceci conduit à sous exploiter un moteur acheté pour être « trop puissant » dont on décale les perfos vers le bas pour l'exploiter en permanence en dessous des 100%. Ainsi le moteur reste exploité en fluage élastique sans altérer son potentiel.

CONDUITE : PRESSIONS E.P.R.

→ POMPAGE (STALL)

Principe du pompage :

Voir livret 15.4 → Décrochage couche limite et reflux

Régulation et contrôle du pompage :

Voir livret 15.4 → VBV, IGV et VSV (principe de chaque système et interactions entre eux)

Conduite associée :

E.P.R. signifie : Engine Pressure Ratio, soit, rapport de pression. On représente généralement ce rapport de pression sous la forme : $Pt7 / Pt2$

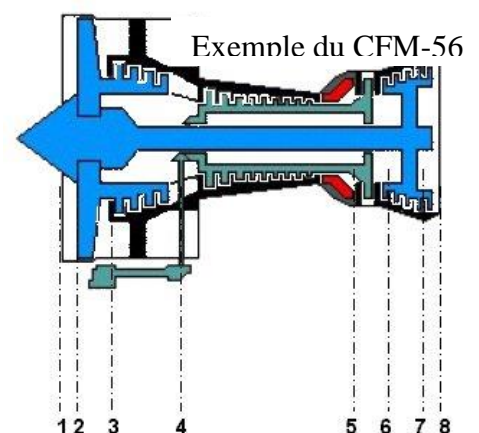
$Pt7$ = pression d'impact après turbine

$Pt2$ = pression d'impact avant compresseur

Pour un réacteur en vol, il n'y a aucun moyen de mesurer la poussée, et très souvent les constructeurs utilisent l'E.P.R. pour fournir une mesure permettant de la connaître.

Afin de connaître la valeur de la poussée à partir de la lecture de l'E.P.R., de l'altitude pression, et du Mach, les constructeurs fournissent des **abaques**.

Description de la chaîne de mesure :

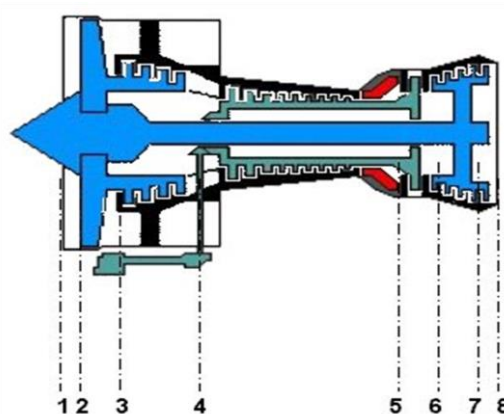


Le transmetteur est constitué de deux capsules anéroïdes¹ recevant respectivement Pt2 et Pt7 et déplaçant un système quotient métrique qui en sortie fournit le rapport Pt7/ Pt2.

Remarque :

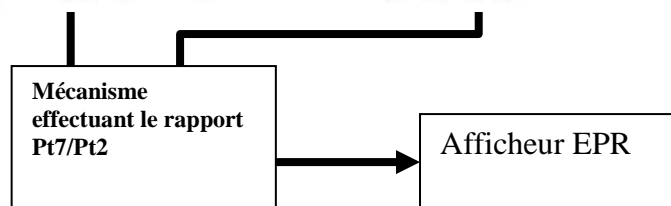
Le découpage des sections définies sur ce réacteur, de 1 à 8, est défini selon la norme américaine.

Attention, certains motoristes commencent la numérotation à partir de 0.



Exemple du CFM-56

Figure 3



Avec ce montage, on aura des valeurs d' E.P.R. comprises entre 1 et 2,8.

Mais ces emplacements des sondes de pressions ne sont pas les seuls utilisés. Ainsi sur les CF6, pour certains avions (par exemple le DC10), on a une sonde de pression totale entre turbines HP et turbines BP. Cette sonde s'appelle la sonde de Pt5.4.

La sonde de Pt2 est située sous le nez de l'avion et l'E.P.R. est alors le rapport Pt5.4/Pt2.

La sonde Pt5.4 étant placée avant les turbines BP, nous aurons des pressions plus importantes que celles que l'on mesure si la sonde est placée après les turbines. Dans ce cas les valeurs d'E.P.R. couvriront une plage plus large, c'est-à-dire que l'on ira de 1 à 6,4 environ.

Remarque :

Le même CF 6 lorsqu'il équipe un A 300 B est conduit en **N1**. Aussi les constructeurs de l'avion proposent-ils en option une mesure de la pression Pt5.4.

Remarque : Effet d'un givrage

Lors d'un décollage, l'E.P.R. est le paramètre essentiel d'affichage de la poussée (lorsque le moteur est conduit à l'EPR), si la sonde Pt2 est obstruée par du givre l'information Pt2 est constante, lors de la mise en poussée Pt7 ↗ donc E.P.R. ↗ mais cet E.P.R. sera surestimé : **danger**. A cet effet la sonde est dégivrée électriquement mais l'utilisation du système reste à la charge du navigant.

AUTRES PARAMETRES DE CONTROLE MOTEUR :

¹ Anéroïde : capteur mesurant la pression ne contenant aucun liquide spécifique.

Vibrations paliers :

Les mesures de vibrations permettent de détecter tout fonctionnement anormal du moteur se traduisant par des vibrations, tels que l'usure d'un palier, pompage tournant, ...

Suivant les types de moteur, on trouvera un capteur au niveau du palier avant ou un capteur au niveau du palier arrière ou les deux à la fois. Lorsqu'on a un capteur compresseur et un capteur turbine, un sélecteur permet de choisir le capteur qui nous intéresse.

Le capteur :

Actuellement les capteurs sont des accéléromètres piézoélectriques contenus dans des boîtiers étanches en acier inoxydable. Après avoir été traité, le signal est envoyé à l'indicateur, via le sélecteur.

L'indicateur :

Nous en donnons une représentation ci-dessous similaire au chapitre précédent : indicateur à aiguilles et ECAM.

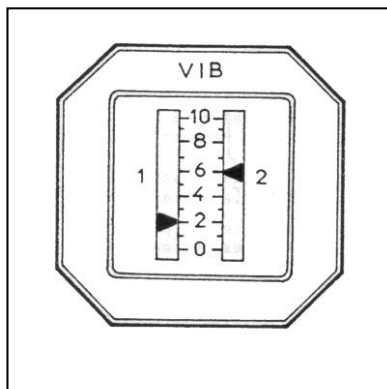


Figure 5



Figure 6

Il comporte une double échelle graduée de zéro à dix sans indication d'unités. Dans le cas du CF6, auquel correspond cet indicateur, l'indication est donnée pour chaque moteur par un index blanc, se déplaçant devant la graduation centrale. L'indication normale doit être comprise entre zéro et cinq, quel que soit le capteur ou la bande sélectionnée. L'appareil ne comporte aucune indication d'unité, mais les graduations correspondent à des millièmes de pouce (mils).

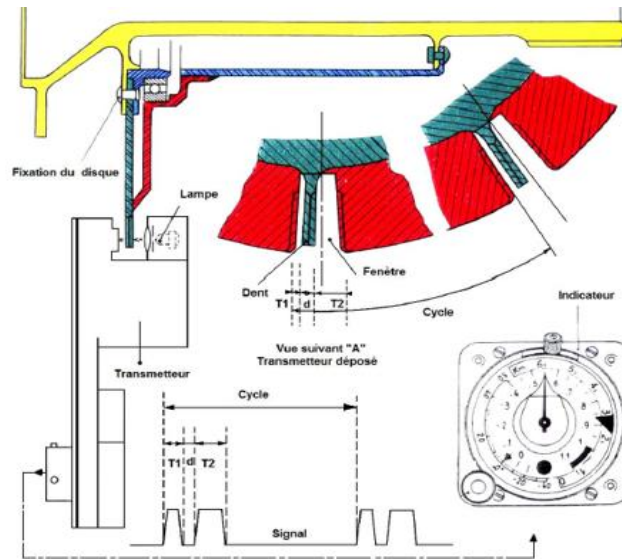
Couplemètre :

La majorité des turbopropulseurs sont équipés de couplemètre à tube de torsion. Le principe de fonctionnement est le suivant : un arbre de liaison (tube de torsion) relie la

turbine motrice et le réducteur. Des capteurs mesurent le décalage angulaire entre les deux extrémités de l'arbre qui se déforme proportionnellement au couple.

Pression et de

Le circuit de pilotes et les d'évaluer l'état des température de retour des pompes importants.



température huile lubrification

lubrification informe les ordinateurs de bord afin fluides : Pression et l'huile au départ et au sont des paramètres

CONCLUSION :

Paramètres de conduite : E.P.R. ou N1

Dans le cas où le moteur est conduit à l'E.P.R., le N1 devient un paramètre de contrôle.

Paramètres de contrôle : principaux (N2, N1 E.G.T., et Fuel flow)
secondaires (Vibrations et Température nacelle)

Quelques exemples de valeurs :

CFM 56 N1 102 % = 5200 tr/min et N2 105,8 % = 15183 tr/min, EGT max = 890°C

CFC650 C N1 100 % = 3432 tr/min et N2 100 % = 9827 tr/min

JT9D N1 100 % = 3600 tr/min et N2 100 % = 8092 tr/min

Remarque :

Le contrôle de la consommation est aussi un point important sur les avions civils. Quelques exemples de valeurs :

	Consommation décollage	au	Consommation (moyenne)	croisière
A320	9 tonnes de kérosène /heure		2,8 tonnes de kérosène /heure	
A340	20 t/h		7 t/h	
B747-400	40 t/h		9 t/h	
Concorde	80 t/h		20 t/h	
A380	Exemples plus récents			
A330				
A350				
A320 néo				
A330 néo				

La figure ci-dessous synthétise les parties visuelles de l'ECAM relatives aux paramètres du contrôle moteur réacteur.

