



Pierre GILLARD/EXT0645

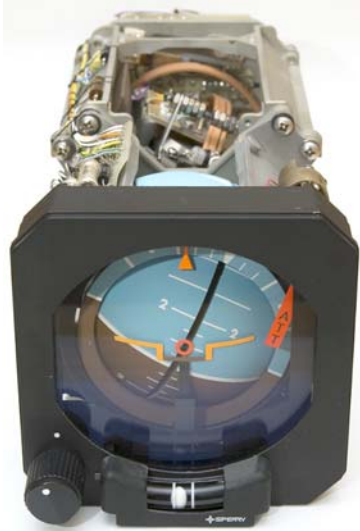
Systèmes gyroscopiques

Avant de débuter le cours ...



Merci !

Présentation du cours



Pierre GILLARD/ENAO082

- Introduction.
- Les axes de mouvement d'un aéronef.
- Principe du gyroscope.
- Entraînement des gyroscopes.
- Gyroscope vertical.
- Gyroscope directionnel.
- Gyromètre.
- Accéléromètre.
- Plates-formes à inertie.
- Systèmes combinés.
- Conclusions.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Introduction



Pierre GILLARD/2005-4354

- Très tôt, dans l'histoire de l'aviation, les concepteurs ont compris l'intérêt que pouvait représenter l'usage de gyroscopes dans un avion.
- Avec l'avènement des avions de transports commerciaux à réaction, les systèmes de plates-formes à inertie ont vu leur apparition.
- Actuellement, bon nombres de systèmes de référence inertielle utilisent des gyrolasers.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Les axes de mouvement d'un aéronef

- Un aéronef, quel qu'il soit, peut bouger selon trois axes :

Axe vertical
ou normal

Axe latéral

Axe
longitudinal

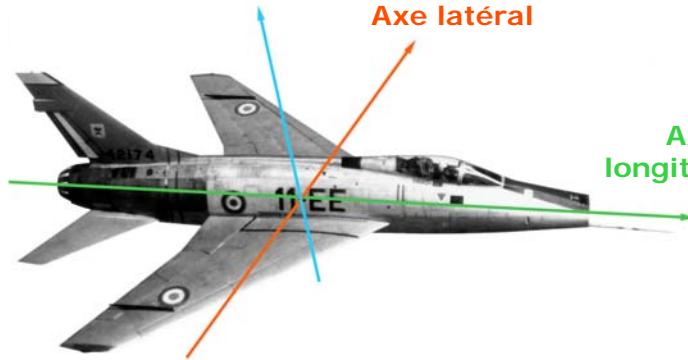
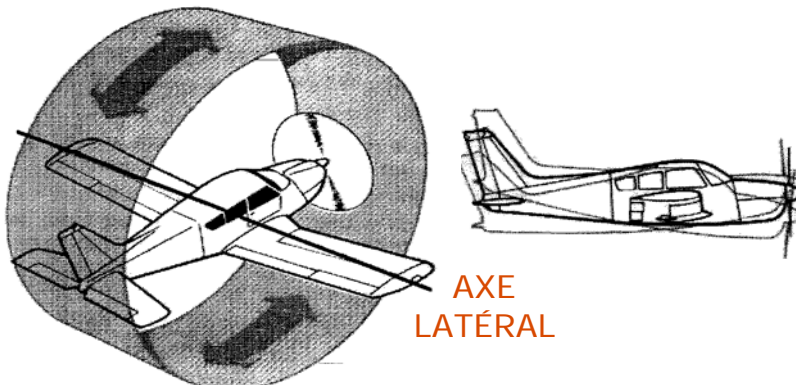


Photo collection Pierre GILLARD

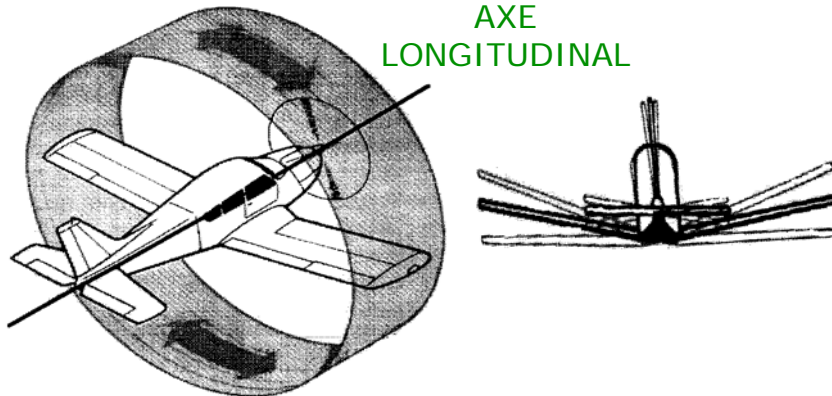
Les axes de mouvement d'un aéronef

- Il y a donc trois mouvements possibles selon ces axes :
 - Le tangage (Pitch) autour de l'axe latéral.



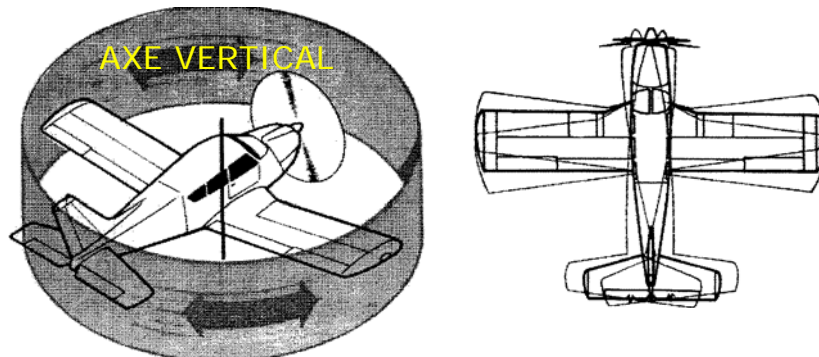
Les axes de mouvement d'un aéronef

- Il y a donc trois mouvements possibles selon ces axes :
- Le tangage (*Pitch*) autour de l'axe latéral.
- Le roulis (*Roll*) autour de l'axe longitudinal.



Les axes de mouvement d'un aéronef

- Il y a donc trois mouvements possibles selon ces axes :
- Le tangage (*Pitch*) autour de l'axe latéral.
- Le roulis (*Roll*) autour de l'axe longitudinal.
- Le lacet (*Yaw*) autour de l'axe vertical.



Les axes de mouvement d'un aéronef

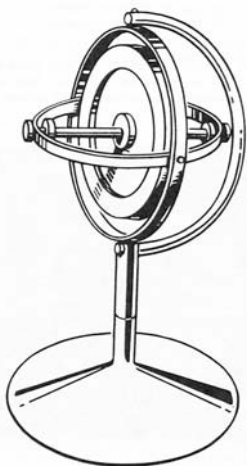
- Tous les mouvements de l'aéronef par rapport à ses différents axes sont indiqués au pilote sur le tableau de bord pour permettre de le maintenir dans une attitude désirée.



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Principe du gyroscope



- Un gyroscope est un assemblage comprenant un rotor qui tourne à haute vitesse à l'intérieur d'un ensemble de supports, appelés « cardans » qui permet à son axe de pointer dans toutes les directions.
- Les applications du gyroscope sont basées sur deux caractéristiques fondamentales :
 - L'inertie gyroscopique.
 - La précession.

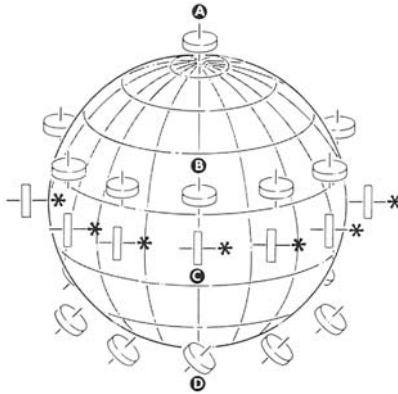
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Principe du gyroscope

L'inertie gyroscopique

- C'est la tendance de toute masse en rotation à maintenir son plan de rotation s'il n'est pas perturbé.



EA-AV-5-02

Principe du gyroscope

L'inertie gyroscopique

- Exemple : stabilisation d'un missile air-air de CF-18 :



Photo © Pierre GILLARD/2023-537192

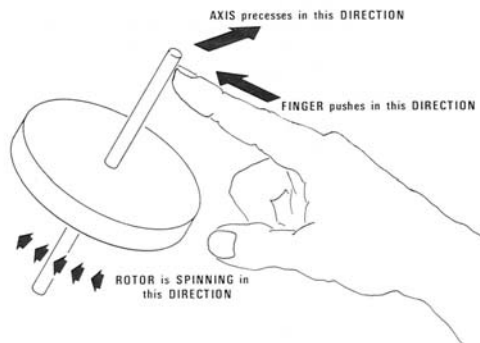


Photo © Pierre GILLARD/2023-537187

Principe du gyroscope

La précession

- C'est la tendance d'une masse en rotation qui, lorsqu'on applique une force perpendiculairement à son axe de rotation, pivote avec 90° de retard dans le sens de rotation de cette masse.



EA-AV-5-01

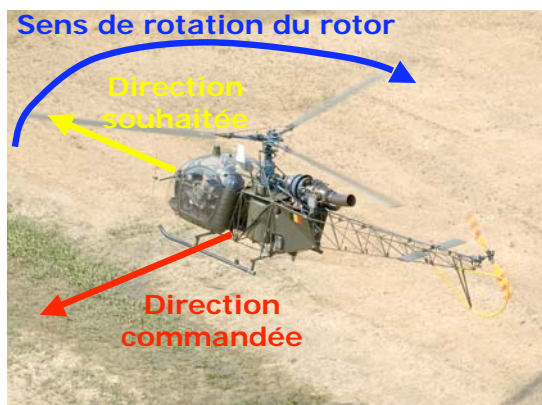
© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Principe du gyroscope

La précession

- Cette propriété a été une surprise pour les pionniers de l'hélicoptère qui, lors des premiers essais en vol ont constaté que leur appareil allait dans une direction située à 90° de celle souhaitée, le rotor principal faisant office de gyroscope.



Pierre GILLARD/2005-3937

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Entraînement des gyroscopes



Educational Innovations

- La masse mise en mouvement dans un gyroscope est un volant d'inertie.
- Ce volant pivote sur un axe dont on a minimisé les frottements avec le cardan dans lequel il est monté afin d'éviter des perturbations et des dérives.
- Le volant tourne à grande vitesse.
- Deux types de systèmes d'entraînement du volant existent :
 - Entraînement pneumatique à dépression (vitesses autour de 8000 tours par minute).
 - Entraînement électrique (vitesses autour de 24000 tours par minute).

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Deux moyens existent pour créer une dépression d'air :
 - Le venturi.



Pierre GILLARD/ENM0064



Pierre GILLARD/ENM0063

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Deux moyens existent pour créer une dépression d'air :
 - Le venturi.
 - La pompe à vide.

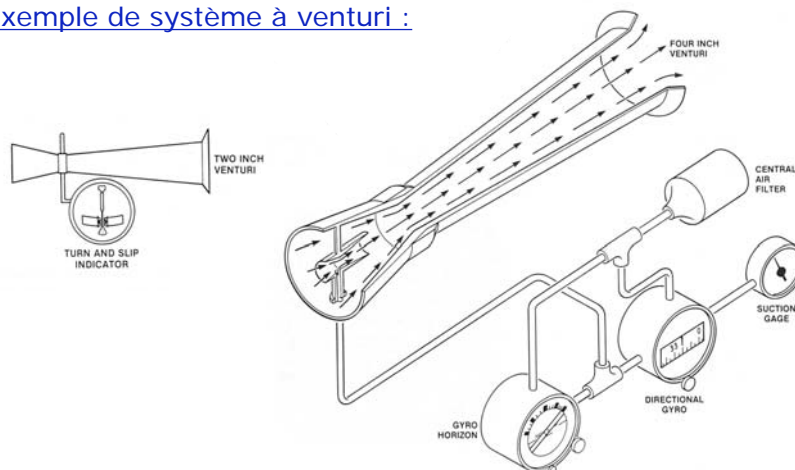


Pierre GILLARD/ENAC0072

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système à venturi :

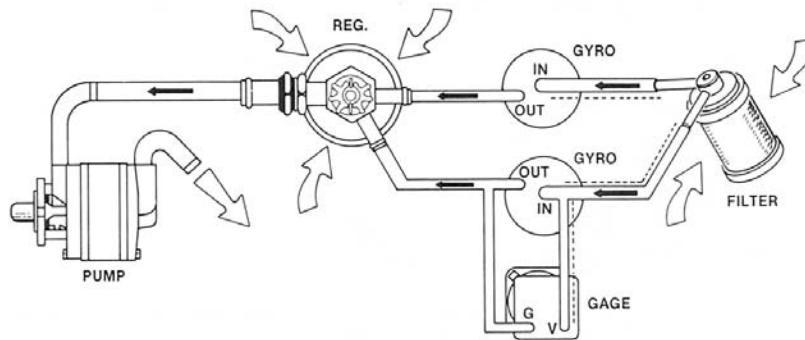


A&P-1-64

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système à pompe à dépression :

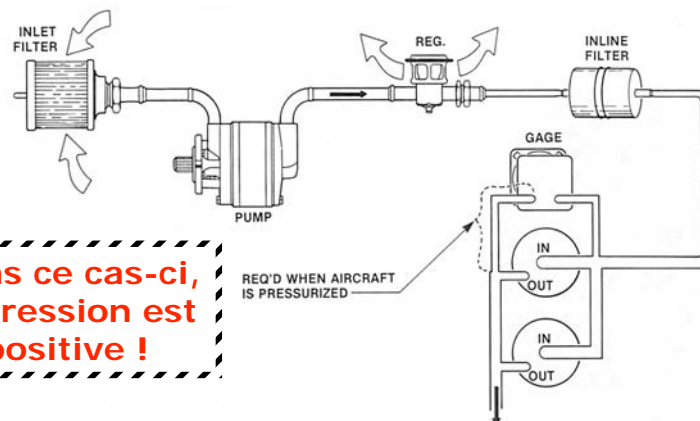


A&P-1-65

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système à pompe à dépression :



A&P-1-66

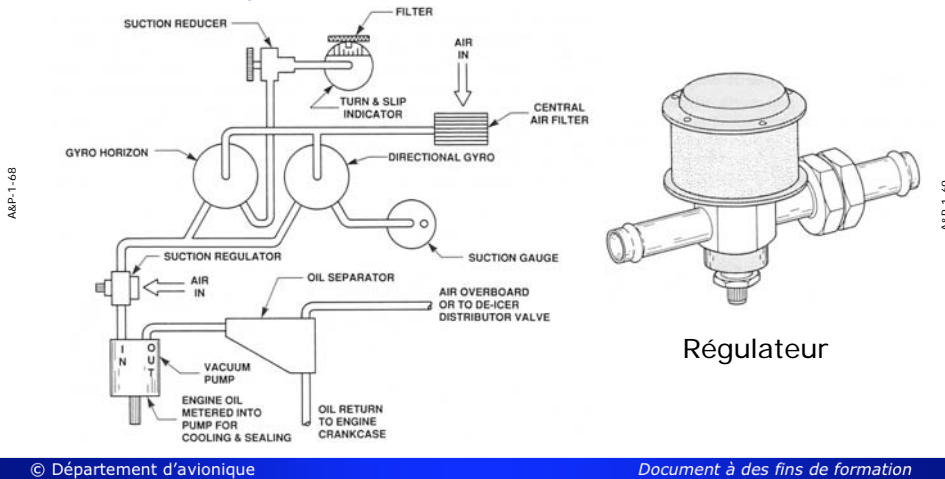
**Dans ce cas-ci,
la pression est
positive !**

REQ'D WHEN AIRCRAFT
IS PRESSURIZED

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

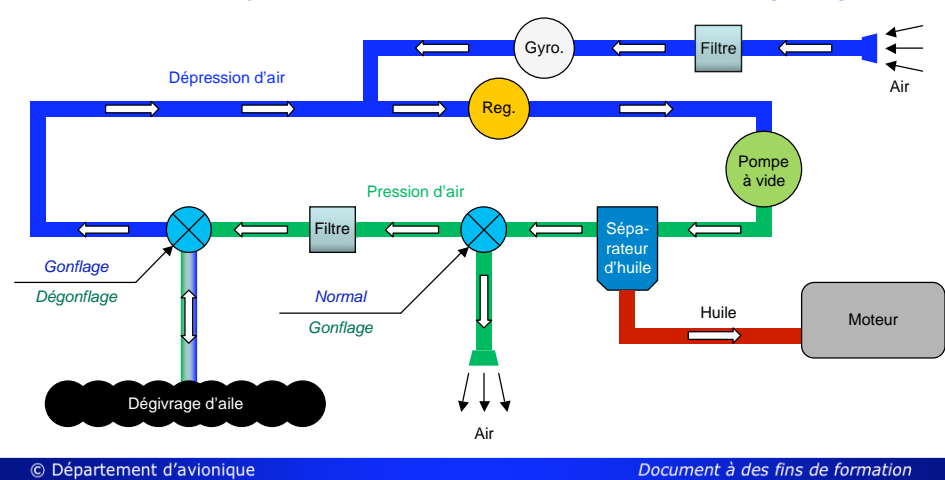
- Exemple de système à pompe à dépression :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

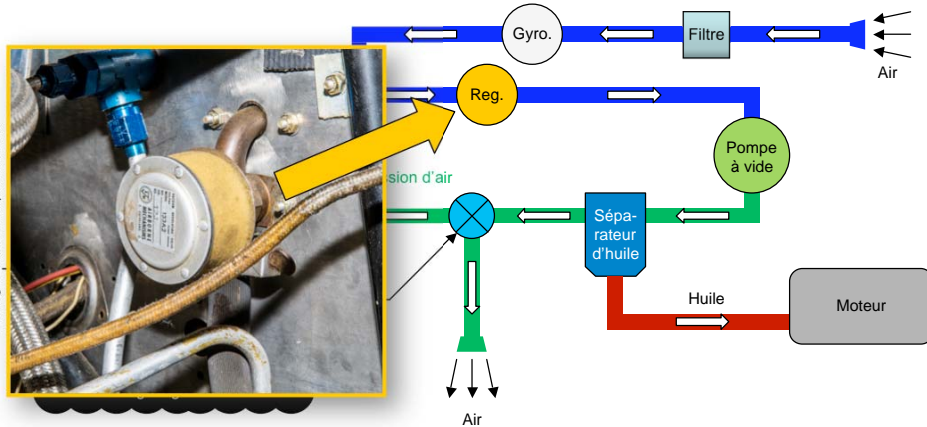
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

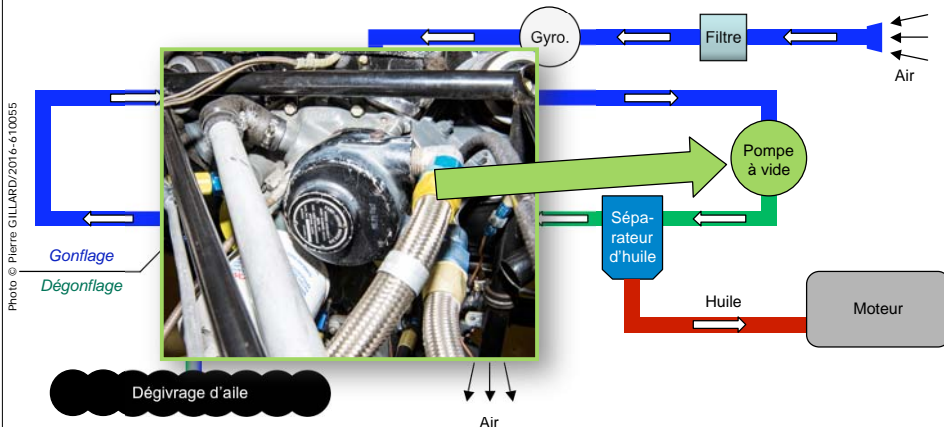
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

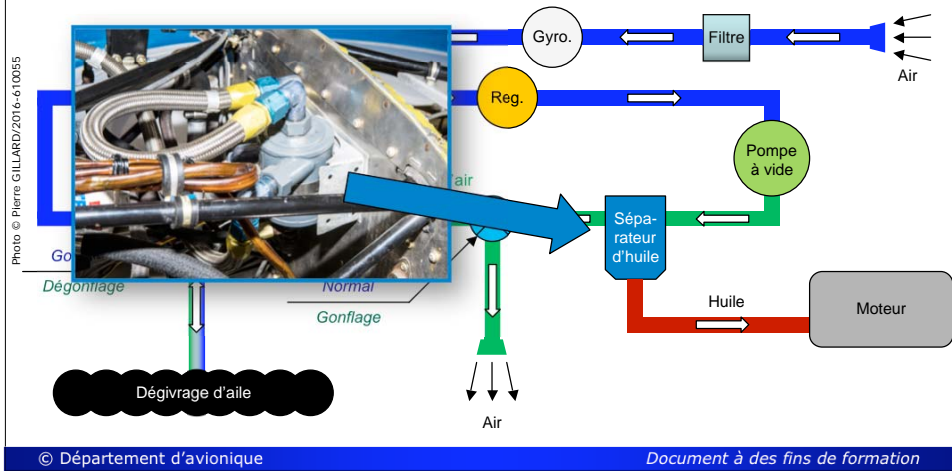
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

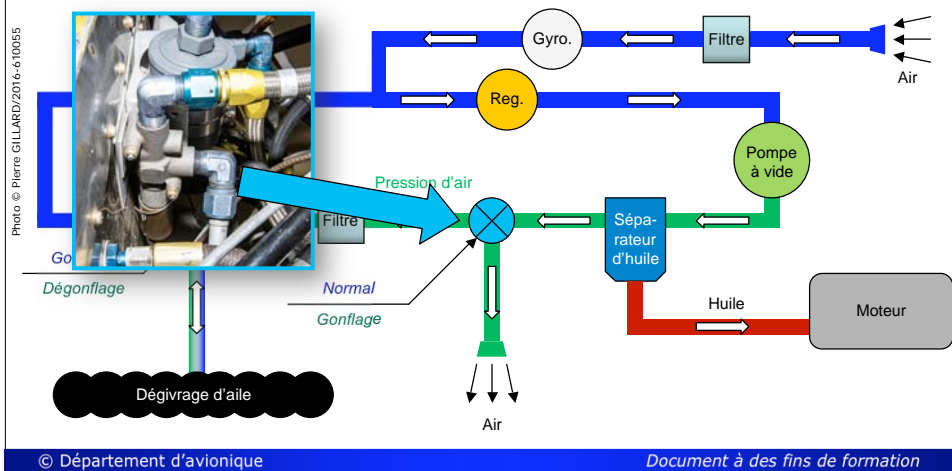
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

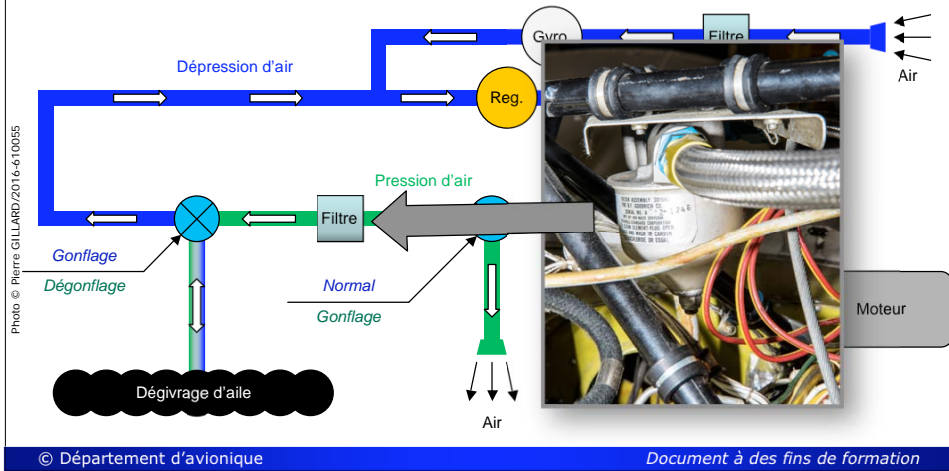
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

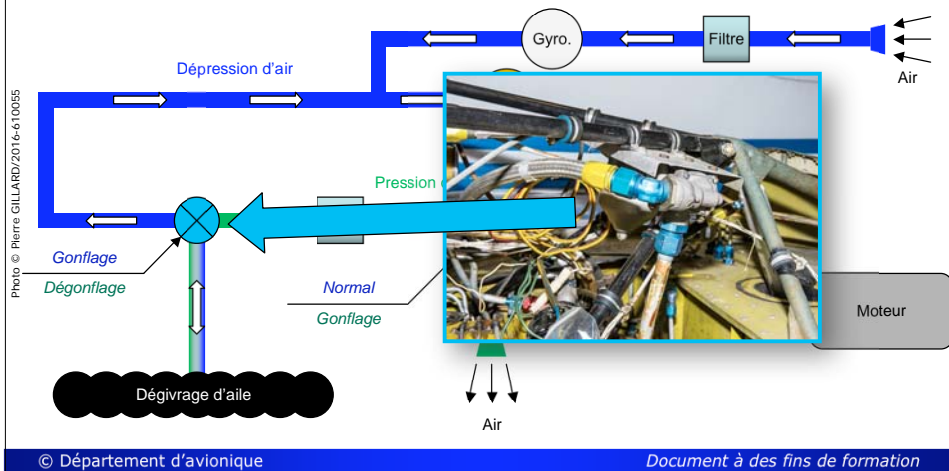
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Photo © Pierre GILLARD/003892



Photo © Pierre GILLARD/2016-6-10055

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Pour vérifier le bon fonctionnement du système à dépression d'air, le pilote regardera régulièrement l'indicateur de dépression (*Suction*) :



Pierre GILLARD/ENAC071

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique



- La majorité des gyroscopes électriques fonctionnent en 14 VDC ou 28 VDC.

- Pour éviter les frottements et l'éventuel mouvement de précession qui en résulterait, certains gyroscopes électriques sont équipés de moteurs sans balais (*brushless*) comme ce coordonnateur de virage :



Images : Aircraft Spruce

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique

- Exemple d'installation d'un gyroscope électrique DC :

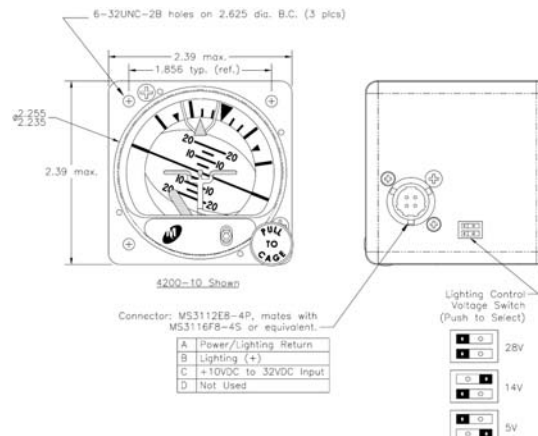
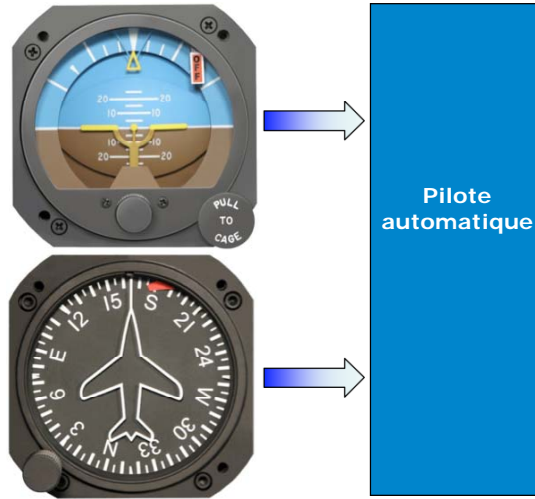


Image : Mid Continent Instruments

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique

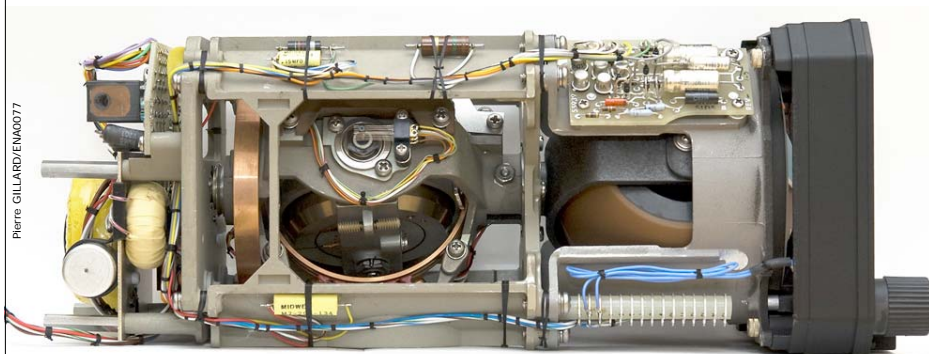
- Souvent, sur les instruments à gyroscopes électriques, il existe des sorties vers un pilote automatique.
- L'horizon artificiel (ADI) ainsi que le gyroscopie directionnel (DG) serviront de références au pilote automatique afin de conserver l'attitude et le cap d'un avion.



Images : Aircraft Spruce & Département d'avionique

Entraînement des gyroscopes

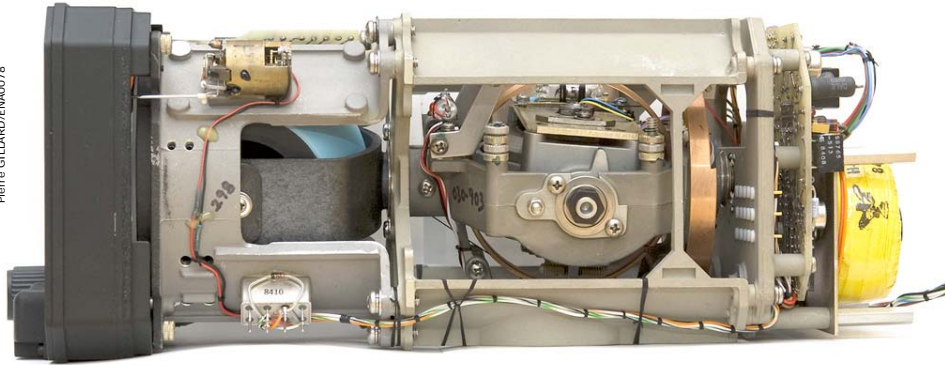
L'entraînement électrique



Pierre GILLARD/ENAO077

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique



Pierre GILLARD/ENAO078

© Département d'avionique

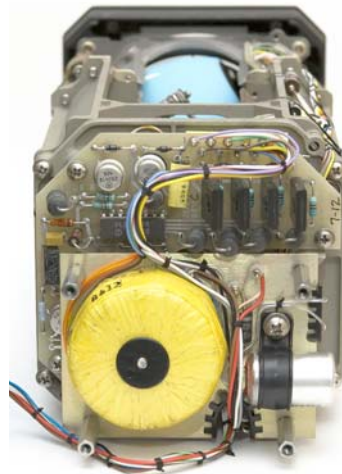
Document à des fins de formation

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique



Pierre GILLARD/ENAO074



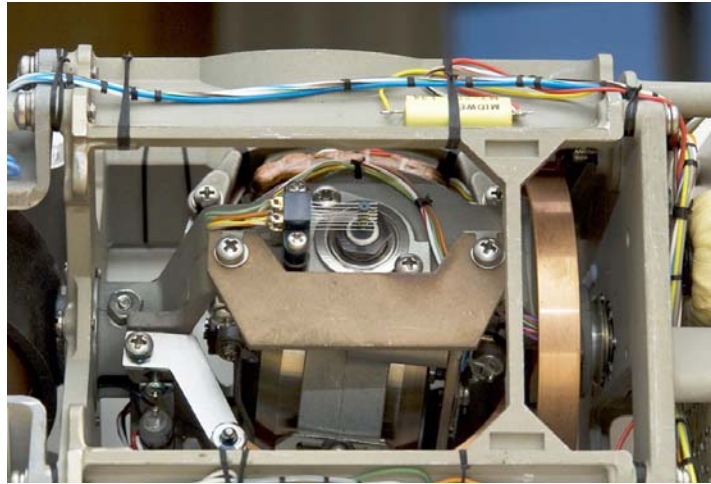
Pierre GILLARD/ENAO075

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique

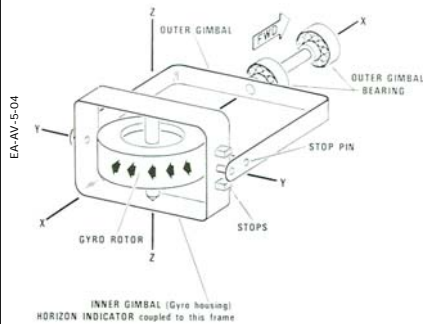


Pierre GILLARD/ENAC0079

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Gyroscope vertical



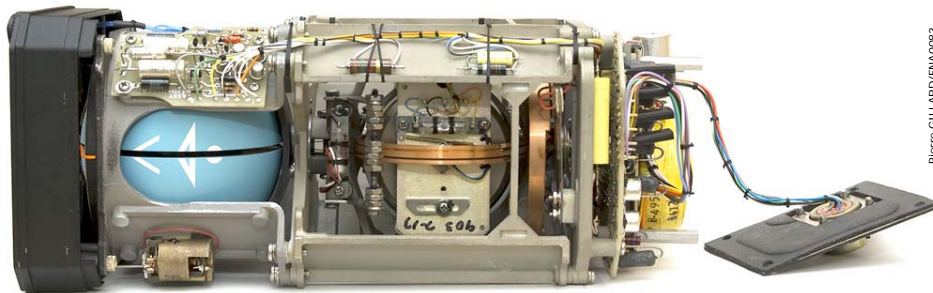
- Le gyroscope vertical est l'horizon artificiel.
- Il peut aussi être appelé « gyro-horizon » ou « indicateur d'assiette » (*ADI-Attitude Director Indicator*).
- Il offre une référence horizontale au pilote.
- L'axe du rotor est vertical et fixé à un système de cardan universel, libre autour des axes de tangage et de roulis.
- C'est un système de gyroscope à deux degrés de liberté.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Gyroscope vertical

- Une boule mobile représentant la terre et le ciel est mécaniquement liée au gyroscope.
- Cette boule bouge suivant la position relative du gyroscope.



Pierre GILLARD/ENAO083

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Gyroscope vertical



Pierre GILLARD/ENAO068

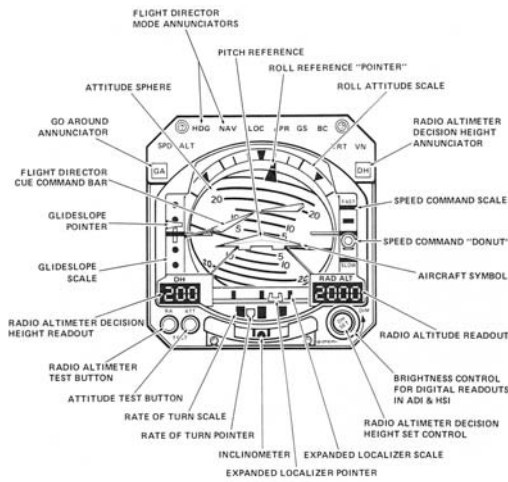
- L'assiette relative de l'aéronef par rapport à l'horizon est indiquée à l'aide d'un symbole d'avion ou d'une barre brisée.
- Le tangage est indiqué sur une échelle verticale (en degrés).
- Le roulis est affiché sur une échelle courbée (en degrés).
- Lorsqu'on est obligé de piloter l'aéronef avec une assiette « nez haut » ou « nez bas » (selon l'attitude, la puissance et le poids), un repère mobile peut être ajusté au moyen d'un bouton localisé en bas de l'instrument.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Gyroscope vertical

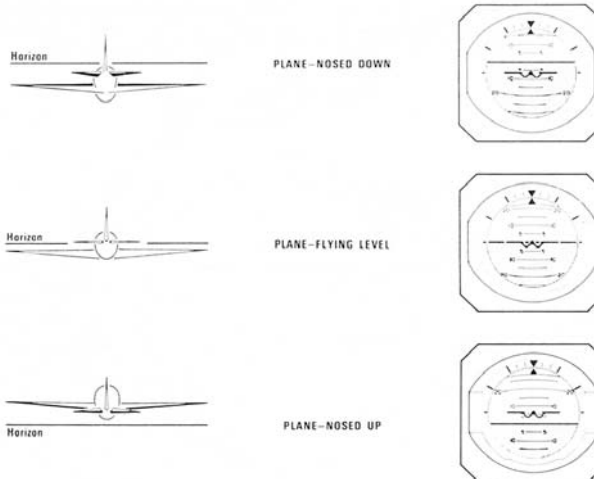
- L'horizon artificiel peut aussi être entouré d'indications provenant d'autres systèmes :



A&P-1-159

Gyroscope vertical

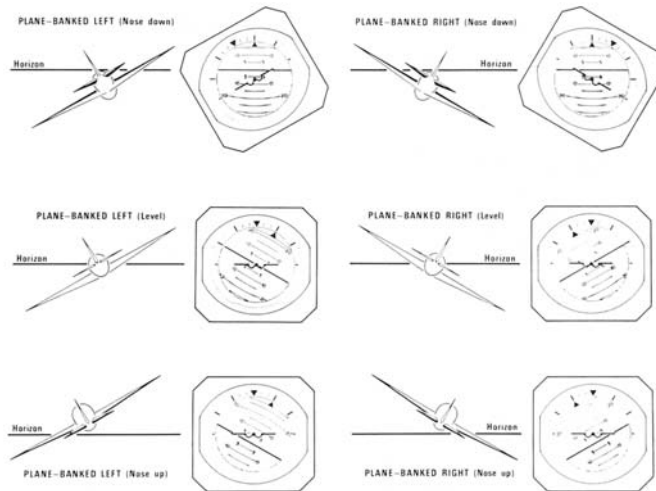
- Indications d'attitude de l'avion :



EA-AV-5-06/07/08

Gyroscope vertical

- Indications d'attitude de l'avion :



EA-AV-5-09/10/11/12/13/14

Gyroscope vertical

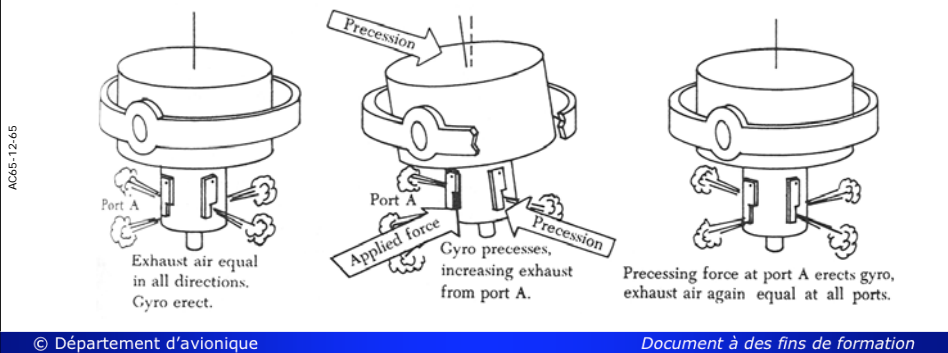


Pierre GILLARD/ENMA0073

- Au repos, le gyroscope est dans une position aléatoire qui n'est pas horizontale.
- Au démarrage du gyroscope, il faut le placer parfaitement horizontal; cette opération est réalisée par le mécanisme de stabilisation du gyroscope.

Gyroscope vertical

- Sur les gyroscopes à entraînement pneumatique, la stabilisation horizontale s'effectue à l'aide de fentes fonctionnant par gravité qui laissent s'échapper un plus ou moins grand débit d'air.
- En fonction du débit d'air s'échappant par une fente, la force résultante lui sera proportionnelle et créera un mouvement de précession du gyroscope l'amenant à la position horizontale.



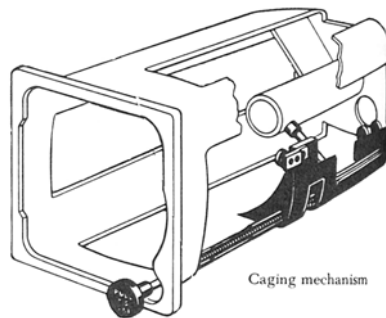
Gyroscope vertical

- Sur les gyroscopes électriques, des masselottes, des billes ou des tubes à goutte mercure sont utilisés afin d'amener le gyroscope en position horizontale par effet de précession.



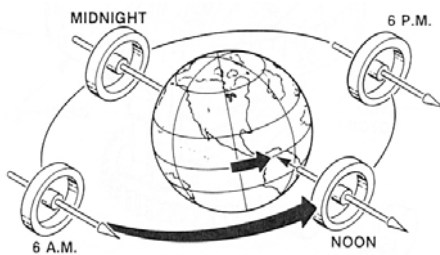
Gyroscope vertical

- Certains gyroscopes moins sophistiqués ont un mécanisme manuel de mise en place du gyroscope (*Manual Caging*).



AC65-12-69

Gyroscope vertical

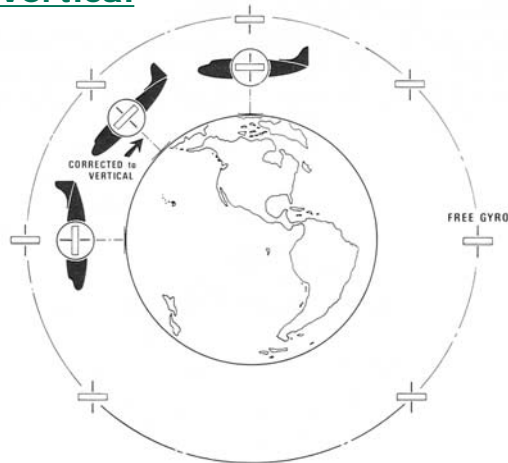


- La terre étant ronde, si aucune correction n'est apportée à la direction de l'axe du gyroscope, en s'éloignant du point de départ, celui-ci ne fonctionnera plus dans un plan parallèle à un plan tangent à la surface de la terre.

- L'indication d'horizon deviendra donc erronée.
- Il faut donc ajouter un système permettant à l'axe du gyroscope de pointer en permanence vers le centre de la terre.

Gyroscope vertical

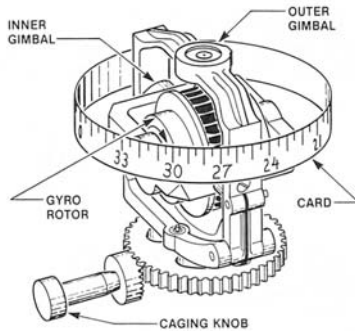
EA-AV-5-03



- Cette correction sera toutefois minime, mais elle a son importance sur les vols à longue distance.

Gyroscope directionnel

ASP-1-49



- Lorsque le gyroscope tourne autour d'un axe situé à l'horizontale, il s'agit d'un gyroscope directionnel.
- Il est aussi appelé « conservateur de cap » ou « gyro directionnel » (*DG-Directional Gyro*).
- L'axe du rotor est horizontal et il est monté à l'intérieur de deux cardans qui peuvent tourner autour des axes perpendiculaires.
- Il s'agit donc d'un gyroscope à deux degrés de liberté.
- Sur le cardan extérieur est attaché le limbe (rose graduée en 360°), qui indique le cap (*Heading*).

Gyroscope directionnel



Pierre GILLARD/ENAO065

- Sur les systèmes modernes, le limbe gradué est remplacé par une rose des vents mobile.
- Cette rose des vents doit être alignée en prenant l'information de la boussole (Compass) et en l'ajustant avec le bouton de réglage.

- Il y a aussi parfois un bouton de cap (Heading) pour le pilote automatique :



© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Gyroscope directionnel



Pierre GILLARD/ENAO069

- Bien souvent, sur les aéronefs équipés pour le vol aux instruments, le conservateur de cap servira aussi pour indiquer les informations du VOR-ILS.
- On parlera alors d'un « indicateur de situation horizontale » (*HSI - Horizontal Situation Indicator*).

© Département d'avionique

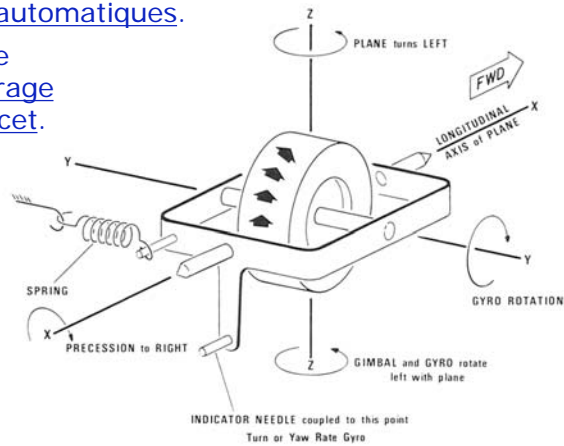
Document à des fins de formation

Gyroscope directionnel

- Les erreurs du conservateur de cap :
 - Erreur de précession mécanique : à cause des forces de friction du mécanisme du gyroscope et des cardans, une dérive d'environ 3° apparaît toutes les 15 minutes.
 - Erreur de précession apparente : à cause de la rotation de la terre (mouvement apparent), il existe une dérive qui varie avec la latitude (aux pôles, on parle d'environ 15° à l'heure).
- Les erreurs du conservateur de cap doivent être corrigées toutes les 15 minutes par une synchronisation avec le compas magnétique (en vol horizontal et sans accélération).
- Sur les systèmes modernes, il ne faut plus effectuer cette correction manuellement, celui-ci étant en relation avec le système de boussole.

Gyromètre

- Le gyromètre est un gyroscope au fonctionnement un peu particulier.
- Il est utilisé dans les indicateurs de virage, mais aussi dans les systèmes de pilotes automatiques.
- L'indicateur de virage indique le taux de virage autour de l'axe de lacet.

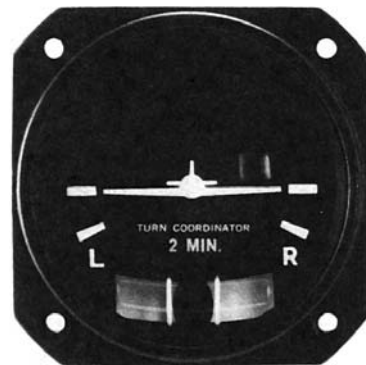


Gyromètre



Pierre GILLARD/ENAC070

- L'indicateur de virage existe sous deux formes différentes.
- Il est toujours associé à la bille indiquant un virage dérapé ou glissé.



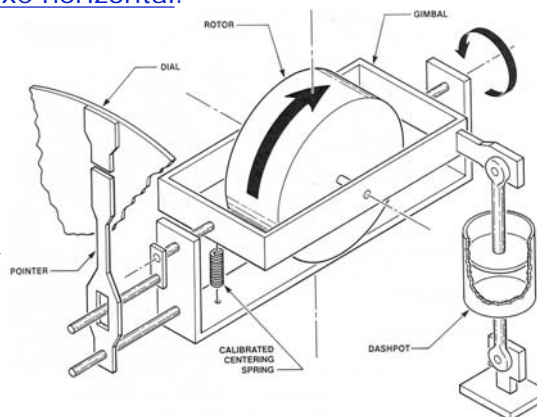
ASP-1-63

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Gyromètre

- Un indicateur de virage et d'inclinaison, parfois appelé « bille-aiguille » (*Turn & Bank Indicator*), est constitué d'un rotor tournant autour de l'axe horizontal.
- Cet axe est lui même monté sur un cardan placé à l'horizontale.
- Le système est donc à un degré de liberté et mesure le taux de virage autour de l'axe de lacet.

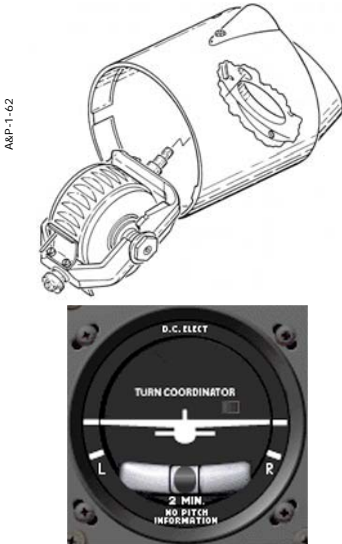


ASP-1-60

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

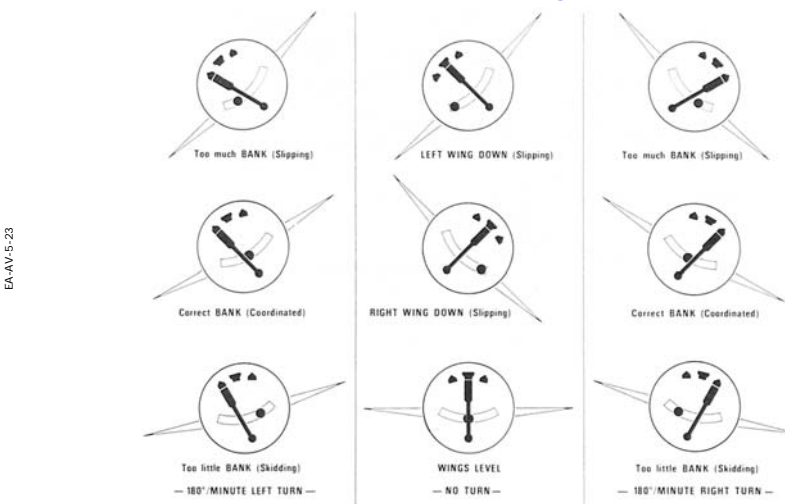
Gyromètre



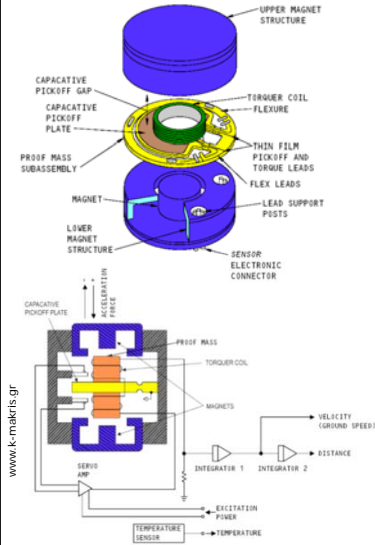
- Un indicateur de virage coordonné (*Turn Coordinator*) aura son cardan principal incliné à 30° par rapport à l'horizontale afin d'être sensible à la fois au taux de virage en lacet et au roulis.
- Pour ne pas confondre un indicateur de virage coordonné avec un simple indicateur de virage et d'inclinaison, le premier utilise une représentation d'avion.
- En général, des indications de taux de virage à « taux unité » (*Rate One*) sont présentes sur le cadran de l'instrument.
- Le « taux unité » représente un taux de virage de 3° par seconde ou de 360° en 2 minutes.

Gyromètre

- Indications sur un indicateur de virage :



Accéléromètre



- Les accéléromètres sont basés sur la relation $\vec{F} = m \times \vec{a}$.
- En connaissant m (masse) et en mesurant F (force), on peut en déduire a (accélération).
- Différents principes physiques sont utilisés dans les accéléromètres.
- Il existe donc de nombreuses variétés d'accéléromètres.



Honeywell



Sensor Portal

Accéléromètre



Liter



Duretech Services



Lifton

- On retrouvera les accéléromètres dans toutes les plates-formes à inertie ainsi que dans les systèmes de pilotes automatiques.

Accéléromètre

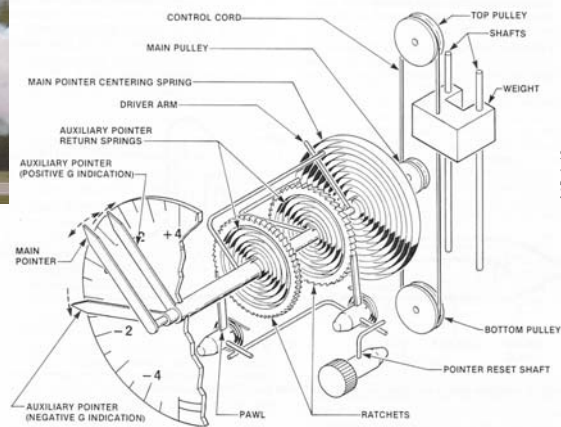


Pierre GILLARD/2008-16513



Aircraft Spruce

- Les avions d'acrobatie ou militaires disposent d'accéléromètres particuliers : les « G-mètres ».



AMP-140

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Plates-formes à inertie



Litton



Boeing

- La plate-forme à inertie a permis d'étendre les possibilités de la navigation à l'estime sur de très longues distances.
- Le besoin pour ce genre de systèmes a coïncidé avec la mise en service des premiers avions de transport commerciaux à réaction longs courriers.

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Plates-formes à inertie

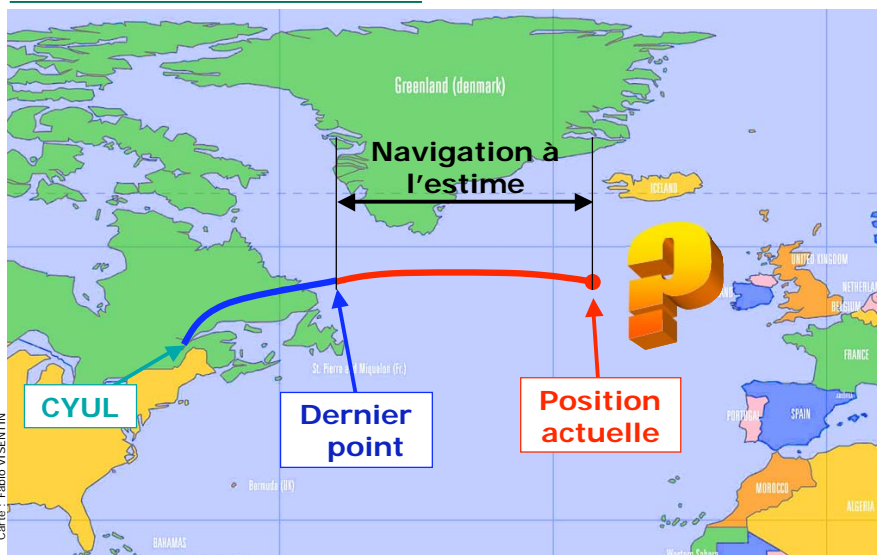
Principes de navigation à l'estime



George HALL/CORBIS

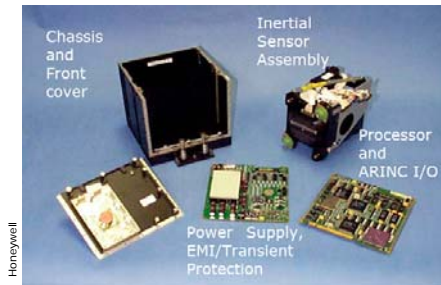
- Au-dessus des zones continentales ou à proximité des côtes, les systèmes de navigation des aéronefs utilisent le DME et le VOR pour déterminer la position à chaque instant.
- Dès que l'aéronef s'éloigne des côtes ou des zones équipées en moyens de radionavigation, son système de navigation n'est plus en mesure de déterminer sa position à chaque instant.
- Il doit estimer sa position actuelle en fonction de la dernière position connue et déterminée.
- Cette opération s'appelle la navigation à l'estime ou « *Dead Reckoning* » (DR).

Plates-formes à inertie



Carte : Fabio VISENTIN

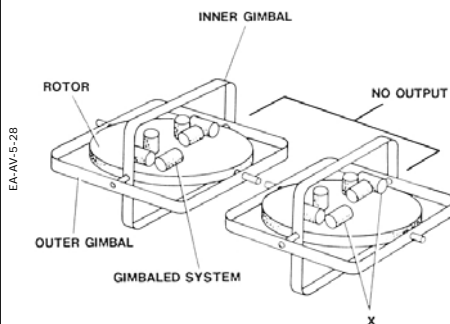
Plates-formes à inertie



- Une plate-forme à inertie est composée de gyroscopes, de gyromètres et d'accéléromètres.
- Des capteurs permettent de déterminer toutes les modifications d'attitude et de vitesse d'un avion.
- Il existe deux types de plates-formes à inertie :
 - Plates-formes mobiles (*Gimbal System*).
 - Plates-formes liées (*Strapdown*).

Plates-formes à inertie

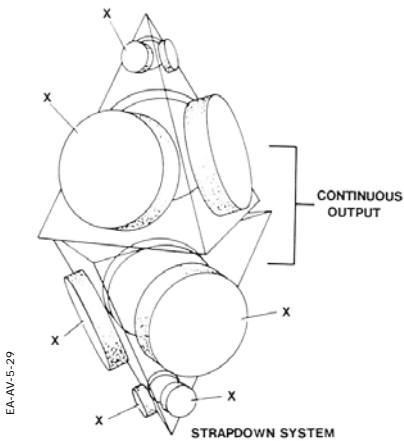
Plates-formes à inertie mobile



- Une plate-forme à inertie mobile a ses capteurs d'accélération isolés de l'avion par un système de cardans.
- Les capteurs sont montés sur un support dont la position est maintenue parallèle à l'axe de rotation de la terre à l'aide de trois gyroscopes à un degré de liberté placés suivant les 3 axes.
- Les mouvements de l'avion « autour » du support mobile sont mesurés.

Plates-formes à inertie

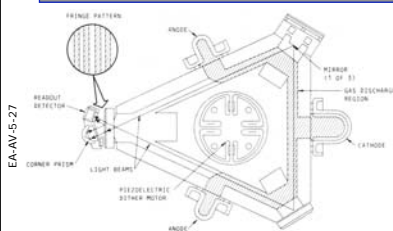
Plates-formes liées



- Une plate-forme à inertie liée a ses capteurs directement solidaires de la structure de l'aéronef.
- Beaucoup de plates-formes liées utilisent des gyrolasers.
- L'avantage des gyrolasers est de ne pas avoir de pièces mobiles.
- Les plates-formes liées ont donc la réputation d'être plus fiables que les plates-formes libres.
- Dans les deux cas, les capteurs comprennent 6 gyros et 6 accéléromètres par système.

Plates-formes à inertie

Les gyrolasers



- Le principe des gyrolasers est basé sur la mesure de la fréquence de deux faisceaux lumineux au laser.
- À une différence de fréquences mesurée correspond un mouvement angulaire.
- Les gyrolasers sont très fiables et ont un MTBF de l'ordre de 25 000 heures ou plus.
- Toutefois, pour éviter des erreurs de mesures lors de mouvements lents, il faut les mettre en vibration, en général à 400 Hz.

Systèmes combinés

• Avec la miniaturisation des composants, des capteurs et de l'électronique, les fabricants de systèmes avioniques sont en mesure de proposer au constructeurs d'aéronefs des solutions intégrées comme, par exemple :

- AHRU/AHRU : *Attitude & Heading Reference System/Unit.*
- ADIRS/ADIRU : *Air Data & Inertial Reference System/Unit.*



AHRU



FMS



EFIS

Systèmes combinés



• Chez Garmin, on a miniaturisé les systèmes à l'extrême pour produire l'ADAHRS (*Air Data, Attitude & Heading Reference System*) G5.

• Le G5 est aussi un écran électronique (EFIS) qui peut être configuré autant en EADI qu'en EHSI.

• Il contient toutes les références inertielles ainsi que des capteurs Pitot et statique.

• Il est essentiellement destiné au marché de la remise à niveau (*retrofit*) en aviation générale.

Systemes combinés

- Les connexions du Garmin G5 sont très limitées :



Image : Aviation Consumer

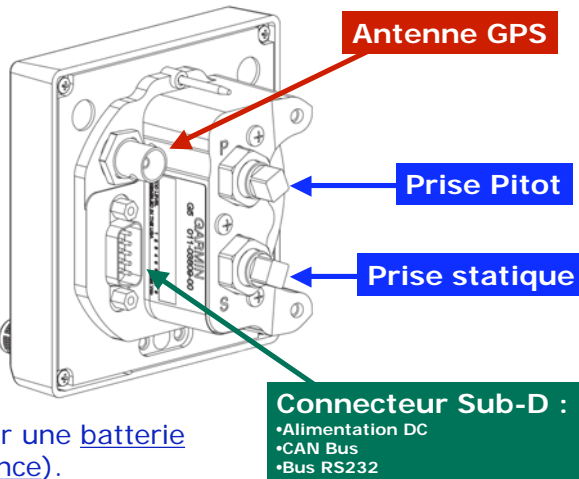


Image : Garmin & Département d'avionique

- On peut aussi ajouter une batterie (alimentation d'urgence).

Systemes combinés

- L'essentiel des liaisons avec les autres appareils se déroulent par bus de données séries (CAN BUS, RS232 et ARINC 429 :

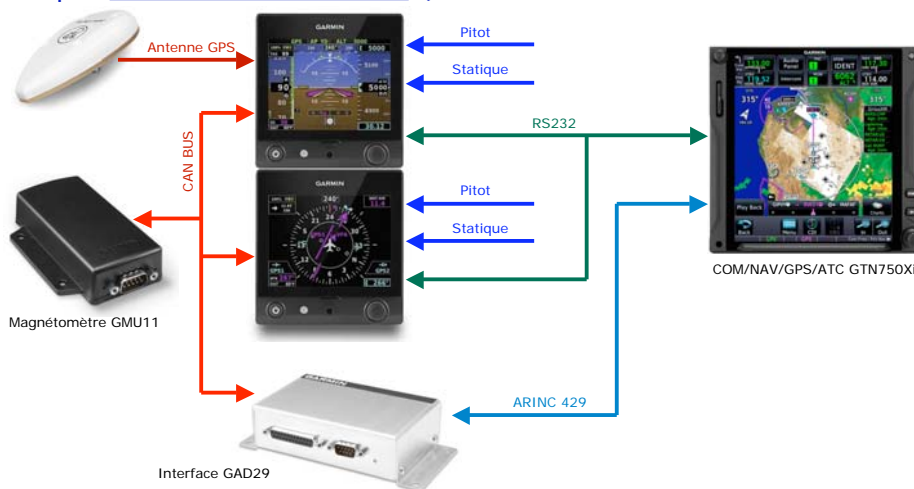


Image : Garmin & Département d'avionique

Conclusions

Pierre GILLARD/ENAC081



- Les systèmes gyroscopiques traditionnels ou à laser continuent d'avoir leur place à bord des aéronefs modernes .
- Ils sont également utilisés dans d'autres engins volants comme les missiles (les missiles de croisière, notamment) ou les fusées .



U.S. Air Force

© Département d'avionique

Document à des fins de formation

Conclusions

Pierre GILLARD/2005-4487



Pierre GILLARD/2005-4488



- On les retrouve également dans les systèmes de prises de vues installés sur les hélicoptères des télévisions et de la police , par exemple.
- Les plates-formes de tirs utilisées à bord d' hélicoptères militaires sont également pourvues de dispositifs gyrostabilisés .

© Département d'avionique

Document à des fins de formation



Merci de votre attention