Systèmes gyroscopiques

Avant de débuter le cours ...

Présentation du cours

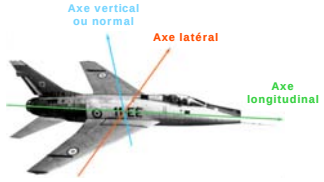
- Introduction.
- Les axes de mouvement d'un aéronef.
- Principe du gyroscope.
- Entraînement des gyroscopes.
- Gyroscope vertical.
- Gyroscope directionnel.
- Gyromètre.
- Accéléromètre.
- Plates-formes à inertie.
- Systèmes combinés.
- Conclusions.

Introduction

- 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.

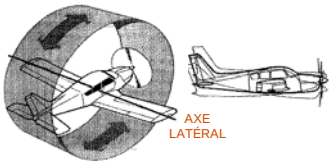
Les axes de mouvement d'un aéronef

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



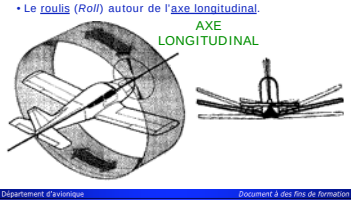
Les axes de mouvement d'un aéronef

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



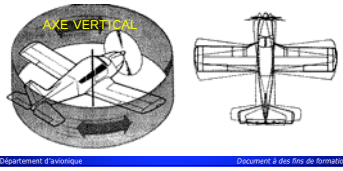
Les axes de mouvement d'un aéronef

- 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.

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.

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.

Principe du gyroscope

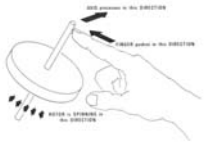
L'inertie gyroscopique

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

Principe du gyroscope

La précession

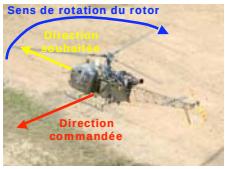
- C'est la tendance d'une masse en rotation qui, lorsqu'on applique une force perpendiculairement à son axe de rotation, pivote avec 90° de retard dans le sens de rotation de cette masse.



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.



Entraînement des gyroscopes

- 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).

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

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

Entraînement des gyroscopes

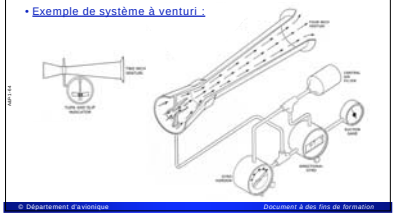
L'entraînement pneumatique à dépression

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

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

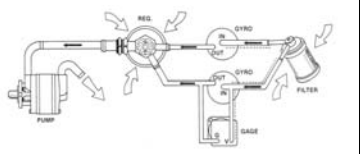
- Exemple de système à venturi :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

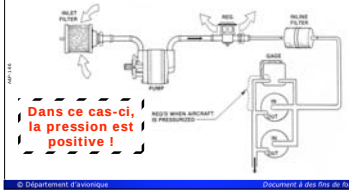
- Exemple de système à pompe à dépression :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système à pompe à dépression :

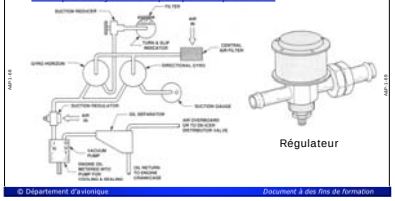


Dans ce cas-ci, la pression est positive !

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système à pompe à dépression :

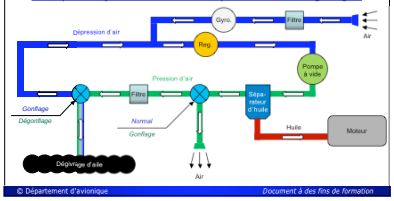


Régulateur

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

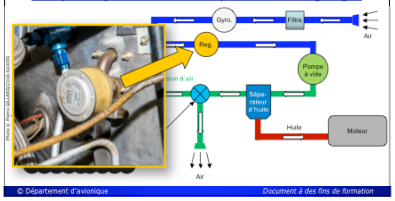
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

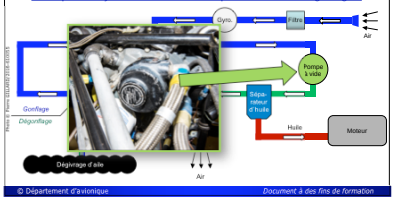
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

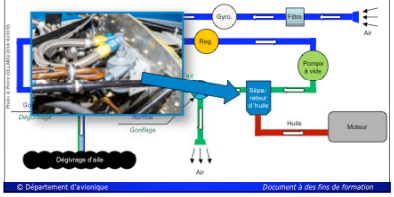
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

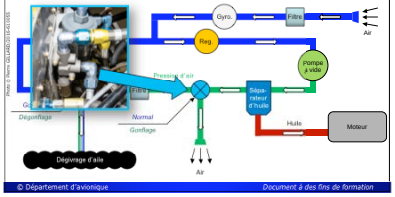
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

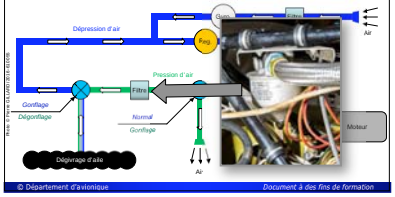
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

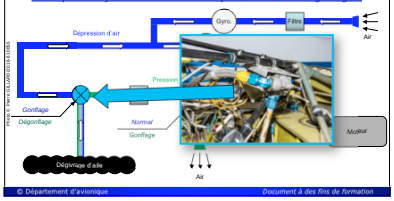
- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



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 :

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*) :

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique

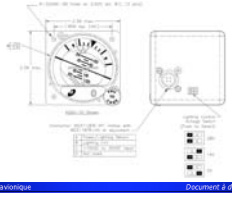
• La majorité des gyroscopes électriques fonctionnent en 14 VDC ou 28 VDC.

• 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 coordinateur de virage :

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique

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

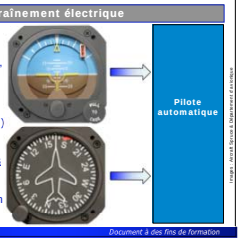


Entraînement des gyroscopes

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 gyroscope directionnel (DG) serviront de références au pilote automatique afin de conserver l'attitude et le cap d'un avion.



Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique

Entraînement des gyroscopes

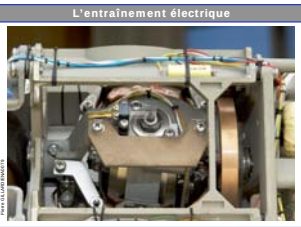
L'entraînement électrique

Entraînement des gyroscopes

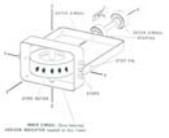
L'entraînement électrique

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique



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.

Gyroscope vertical

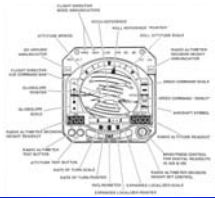
- Une boule mobile représentant la terre et le ciel est mécaniquement liée au gyroscope.
- Cette boule bouge suivant la position relative du gyroscope.

Gyroscope vertical

- 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.

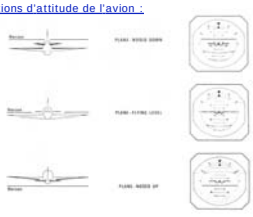
Gyroscope vertical

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



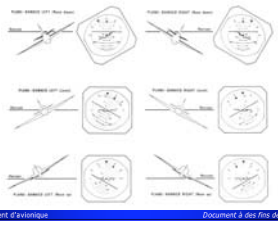
Gyroscope vertical

- Indications d'attitude de l'avion :



Gyroscope vertical

- Indications d'attitude de l'avion :

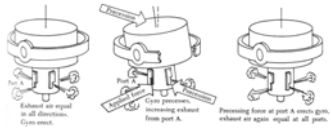


Gyroscope vertical

- 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.

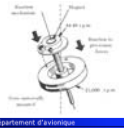
Gyroscope vertical

- 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.



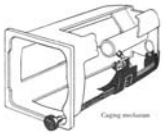
Gyroscope vertical

- 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.

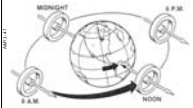


Gyroscope vertical

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

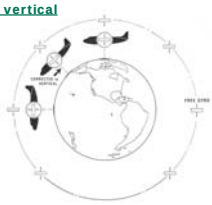


Gyroscope vertical



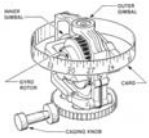
- La terre étant ronde, si aucune correction n'est apportée à la direction de l'axe du gyroscope, en s'éloignant du point de départ, celui-ci ne fonctionnera plus dans un plan parallèle à un plan tangent à la surface de la terre.
- L'indication d'horizon deviendra donc erronée.
- Il faut donc ajouter un système permettant à l'axe du gyroscope de pointer en permanence vers le centre de la terre.

Gyroscope vertical



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

Gyroscope directionnel



- 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

- 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 :

Gyroscope directionnel

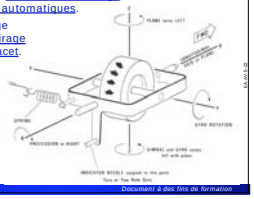
- Bien souvent, sur les aéronefs équipés pour le vol aux instruments, le conservateur de cap servira aussi pour indiquer les informations du VOR-ILS.
- On parlera alors d'un « indicateur de situation horizontale » (*HSI-Horizontal Situation Indicator*).

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.

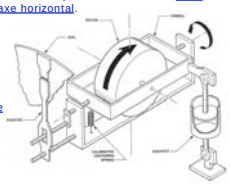


Gyromètre

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

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.



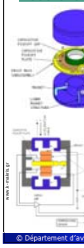
Gyromètre

- 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



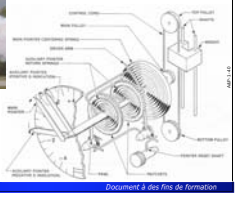
- Les accéléromètres sont basés sur la relation $\vec{F} = m . \vec{a}$.
- En connaissant m (masse) et en mesurant F (force), on peut en déduire a (accélération).
- Différents principes physiques sont utilisés dans les accéléromètres.
- Il existe donc de nombreuses variétés d'accéléromètres.

Accéléromètre

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

Accéléromètre

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



Plates-formes à inertie

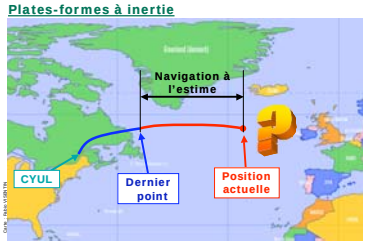
- La plate-forme à inertie a permis d'étendre les possibilités de la navigation à l'estime sur de très longues distances.
- Le besoin pour ce genre de systèmes a coïncidé avec la mise en service des premiers avions de transport commerciaux à réaction longs courriers.

Plates-formes à inertie

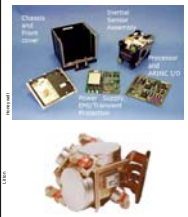
Principes de navigation à l'estime

- 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



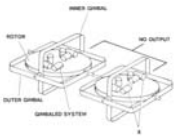
Plates-formes à inertie



- Une plate-forme à inertie est composées 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

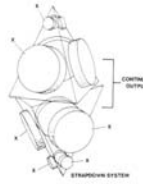
Plates-formes à inertie mobile



- 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

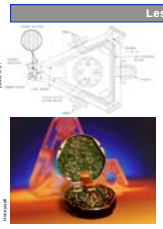
Plates-formes liées



- 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

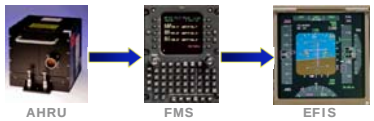
Les gyrolasers



- 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 manufacturiers de systèmes avioniques sont en mesure de proposer au constructeurs d'aéronefs des solutions intégrées comme, par exemple :
  - AHRS/AHRU : *Attitude & Heading Reference System/Unit.*
  - ADIRS/ADIRU : *Air Data & Inertial Reference System/Unit.*

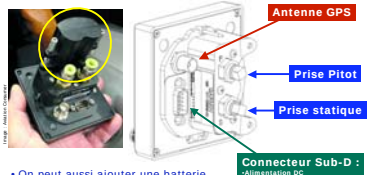


Systèmes combinés

- 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.

Systèmes combinés

- Les connexions du Garmin G5 sont très limitées :



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

Systèmes combinés

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

Conclusions

- 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.

Conclusions

- 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.

Merci de votre attention