

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Systèmes gyroscopiques

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Avant de débiter le cours ...

Merci !

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

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.

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

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.

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Les axes de mouvement d'un aéronef

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

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

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.

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

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.

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

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.

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

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'aéronautique Document 2 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 **précission**.

Principe du gyroscope

L'inertie gyroscopique

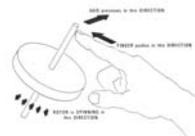
- C'est la tendance de toute **masse en rotation** à **maintenir son plan de rotation** s'il n'est pas perturbé.



Principe du gyroscope

La précission

- 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 précission

- 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**.



Entrainement 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 :
 - Entrainement pneumatique à dépression** (vitesses autour de 8000 tours par minute).
 - Entrainement électrique** (vitesses autour de 24000 tours par minute).

Entrainement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

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



Entrainement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

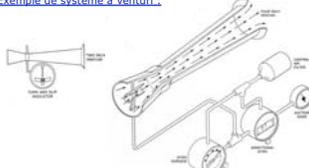
- Deux moyens existent pour **créer une dépression d'air** :
 - Le **venturi**.
 - La **pompe à vide**.



Entrainement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

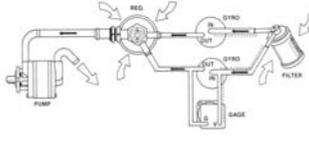
- Exemple de système à **venturi**.



Entrainement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système à **pompe à dépression**.



ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système à pompe à dépression :

Dans ce cas-ci, la pression est positive !

© Département d'aéronautique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système à pompe à dépression :

Régulateur

© Département d'aéronautique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :

© Département d'aéronautique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :

© Département d'aéronautique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :

© Département d'aéronautique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :

© Département d'aéronautique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :

© Département d'aéronautique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :

© Département d'aéronautique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE AÉRONAUTIQUE ET TECHNIQUE

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :

© Département d'aéronautique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION ET DE NAVIGATION

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement pneumatique à dépression

- Exemple de système combiné à dépression et de dégivrage :



© Département d'Avionique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION ET DE NAVIGATION

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) :



© Département d'Avionique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION ET DE NAVIGATION

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique



© Département d'Avionique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION ET DE NAVIGATION

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique



© Département d'Avionique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION ET DE NAVIGATION

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique

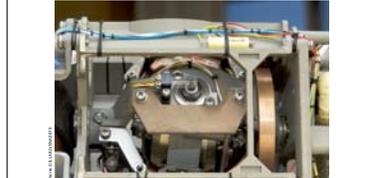


© Département d'Avionique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION ET DE NAVIGATION

Entraînement des gyroscopes

L'entraînement électrique

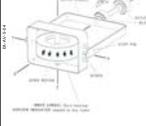


© Département d'Avionique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION ET DE NAVIGATION

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 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION ET DE NAVIGATION

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.



© Département d'Avionique Document 3 des fins de formation

ENNA ÉCOLE NATIONALE D'AVIATION ET DE NAVIGATION

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.



© Département d'Avionique Document 3 des fins de formation

Gyroscope vertical

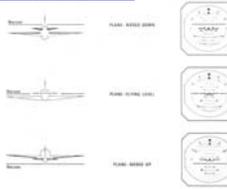
- L'horizon artificiel peut aussi être entouré d'indications provenant d'autres systèmes :



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

Gyroscope vertical

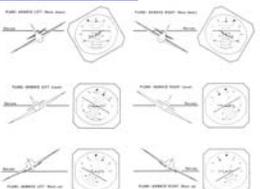
- Indications d'attitude de l'avion :



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

Gyroscope vertical

- Indications d'attitude de l'avion :



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

Gyroscope vertical

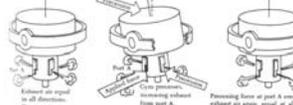
- Au repos, le gyroscope est dans une position aléatoire qui n'est pas horizontale.
- Au démarrage du gyroscope, il faut le placer parfaitement horizontal; cette opération est réalisée par le mécanisme de stabilisation du gyroscope.



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

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.



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

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.



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

Gyroscope vertical

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



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

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.



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

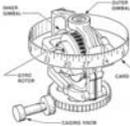
Gyroscope vertical

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



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

Gyroscopie directionnelle



- Lorsque le gyroscope tourne autour d'un **axe situé à l'horizontale**, il s'agit d'un **gyroscopie directionnelle**.
- 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 **gyroscopie à deux degrés de liberté**.
- Sur le **cardan extérieur** est attaché le **limbe** (rose graduée en 360°), qui indique le **cap** (*Heading*).

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

Gyroscopie directionnelle



- 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'aéronautique Document 2 des fins de formation

Gyroscopie directionnelle



- 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'aéronautique Document 2 des fins de formation

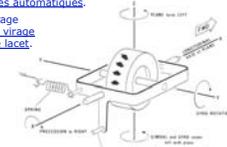
Gyroscopie directionnelle

- 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**.

© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

Gyromètre

- Le **gyromètre** est un **gyroscopie 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**.



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

Gyromètre

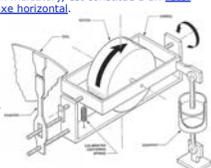


- L'**indicateur de virage** existe sous **deux formes différentes**.
- Il est toujours associé à la **bille** indiquant un **virage dérapé** ou **glissé**.

© Département d'aéronautique Document 2 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**.



© Département d'aéronautique Document 2 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**.



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

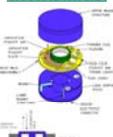
Gyromètre

- **Indications sur un indicateur de virage :**



© Département d'aéronautique Document 2 des fins de formation

Accéléromètre



- Les accéléromètres sont basés sur la relation $F = m \cdot a$.
- 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.



© Département d'Avionique Document 2 des Sys de Formation

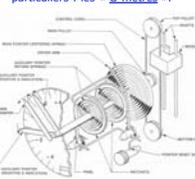
Accéléromètre




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

© Département d'Avionique Document 2 des Sys de Formation

Accéléromètre

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

© Département d'Avionique Document 2 des Sys de Formation

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 long courrier.

© Département d'Avionique Document 2 des Sys de Formation

Plates-formes à inertie

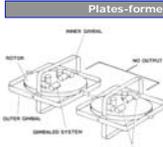


- Une plate-forme à inertie est composée de gyroscopes, de gyromètres et d'accéléromètres.
- Des capteurs permettent de déterminer toutes les modifications d'attitude et de vitesse d'un avion.
- Il existe deux types de plates-formes à inertie :
 - Plates-formes mobiles (Gimbal System).
 - Plates-formes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

© Département d'Avionique Document 2 des Sys de Formation

Plates-formes à inertie

Plates-formes à inertie mobile

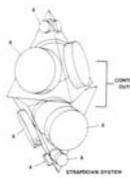


- Une plate-forme à inertie mobile a ses capteurs d'accélération isolés de l'avion par un système de cardans.
- Les capteurs sont montés sur un support dont la position est maintenue parallèle à l'axe de rotation de la terre à l'aide de trois gyroscopes à un degré de liberté placés suivant les 3 axes.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

© Département d'Avionique Document 2 des Sys de Formation

Plates-formes à inertie

Plates-formes liées

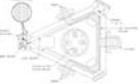


- Une plate-forme à inertie liée a ses capteurs directement solidaires de la structure de l'aéronef.
- Beaucoup de plates-formes liées utilisent des gyrolasers.
- L'avantage des gyrolasers est de ne pas avoir de pièces mobiles.
- Les plates-formes liées ont donc la réputation d'être plus fiables que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

© Département d'Avionique Document 2 des Sys de Formation

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.

© Département d'Avionique Document 2 des Sys de Formation

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.



© Département d'Avionique Document 2 des Sys de Formation

ÉNA ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

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 aéronefs volants comme les missiles (les missiles de croisière, notamment) ou les fusées.



© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

ÉNA ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE

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 tir utilisées à bord d'hélicoptères militaires sont également pourvues de dispositifs gyrostabilisés.



© Département d'aéronautique Document à des fins de formation

ÉNA ÉCOLE NATIONALE AÉROTECHNIQUE



Merci de votre attention

© Département d'aéronautique Document à des fins de formation