



Les Instruments





Le tableau de bord d'un avion léger

Quelques instruments

Simple, il suffit de les comprendre



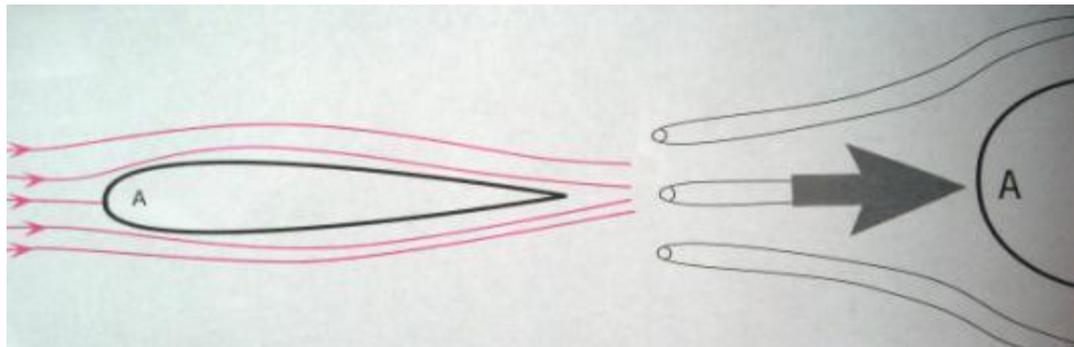
La chaine anémométrique

L'ALTIMÈTRE



L'écoulement de l'air

- Sur les bords d'attaque s'exercent :
 - La pression atmosphérique ou pression statique de l'air (pression de l'air au repos).
 - La pression des particules d'air créée au moment de l'impact (due à la libération de leur énergie cinétique).



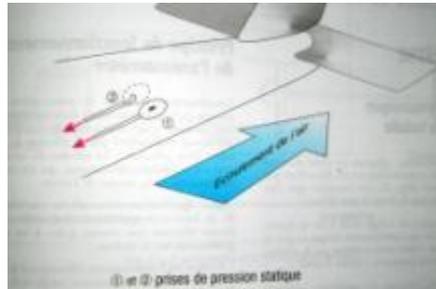
- Cette pression est appelée :
 - **PRESSION DYNAMIQUE**

Remarque : cette pression varie en fonction de la vitesse de l'avion ; plus la vitesse est grande, plus la pression dynamique est élevée.



Le circuit anémométrique

- Il est composé de deux types de capteurs
 - Les capteurs Dynamiques placés dans l'écoulement de l'air; ils indiquent une pression totale : le TUBE PITOT
 - Les capteurs Statiques placés perpendiculairement à l'écoulement de l'air; ils indiquent une pression statique





L'anémomètre

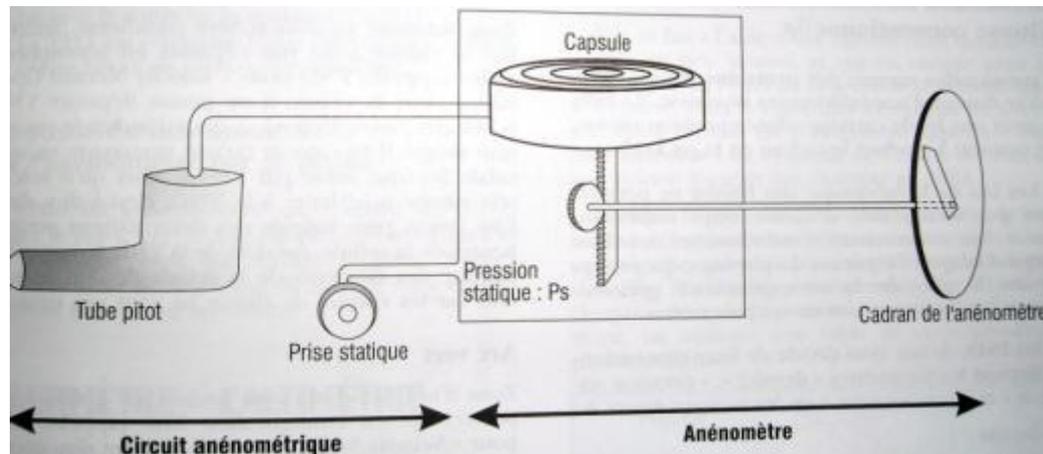
Appelé aussi le Badin du nom de son constructeur

Donne une indication de Vitesse : la VI – Vitesse Indiquée



Fonctionnement de l'anémomètre.

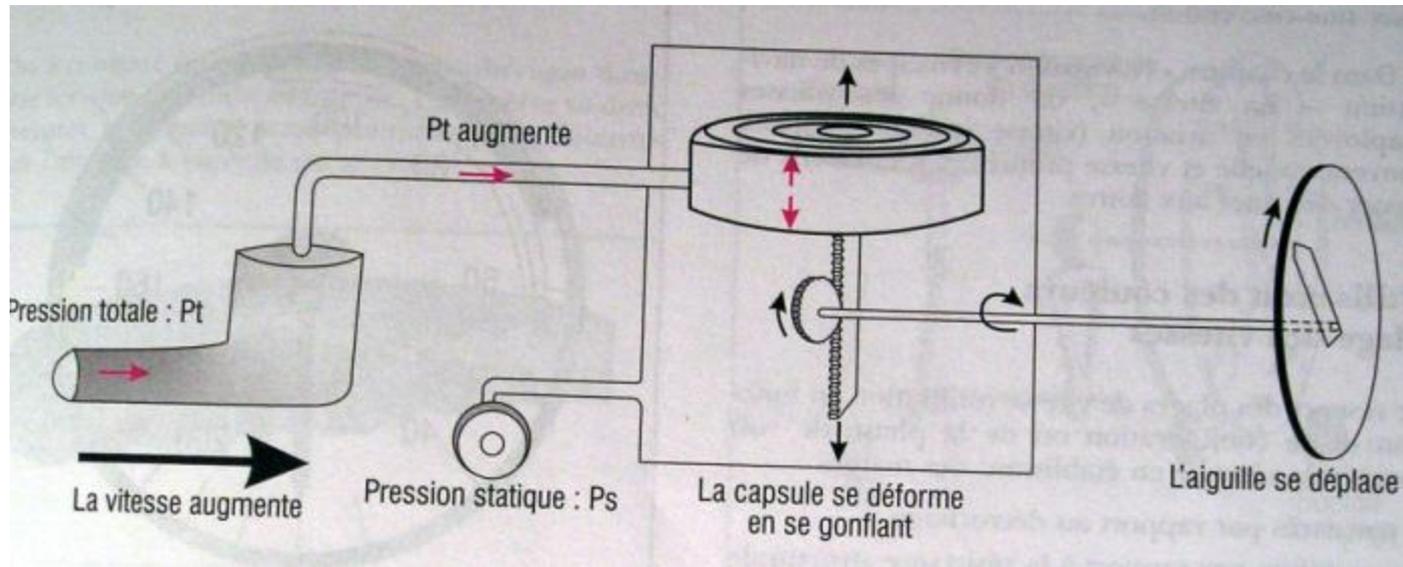
- L'anémomètre effectue la différence entre la mesure de la pression totale et la mesure de la pression statique.
- Le résultat est donc la pression dynamique.
- Le système se compose d'une capsule, reliée intérieurement au tube de Pitot ; l'extérieur de la capsule est lui relié aux capteurs de pression statique.





Le circuit anémométrique

- Cependant, l'anémomètre donne une information de vitesse et non une information de pression.
- La solution est donc de faire correspondre une valeur de pression à une graduation sur l'instrument.





La graduation de l'anémomètre

- Comment faire correspondre une pression à une vitesse ?
La loi de Bernouilli :

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{stat}} + 1/2\rho V^2$$

- On fixe donc conventionnellement:
 - Densité égale à 1.
 - Pression: 1013,25 hPa.
 - Température: 15°C.
- Cette convention permet d'exprimer la vitesse en fonction de la pression dynamique.
 - Nous obtenons donc une Vitesse Conventionnelle.
- Pour l'aviation générale,

$$V_C \text{ est égale à } V_i$$

- Nota :
 - Erreur instrumentale négligeable.
 - Erreurs de pression possibles compte tenu des perturbations de l'écoulement.
- Sur DR400, $V_c = V_i$ (souvent le cas en aviation générale)
 - La V_i peut être en Km ou Kts (1 nœud = 1,852 km/h)
- Vitesse Indiquée - Vitesse Propre. Pour la Vitesse Propre , la formule simplifiée est :
 - on corrige de 1 % par 600'
 - on corrige de 1 % tous les 5° de différence par rapport à la température standard.
- A retenir: plus haut, plus chaud, plus vite.



La graduation de l'anémomètre

- Plages des vitesses et Utilisation de couleurs.
- Arc blanc:
 - Zone d'utilisation normale dans la configuration atterrissage
 - Limite basse:
 - Vitesse de décrochage plein volets.
 - Limite haute:
 - Vitesse maximale d'utilisation des volets: V_{fe}
- Arc vert:
 - Zone d'utilisation normale de l'avion.
 - Limite basse:
 - Vitesse de décrochage dans la configuration lisse.
 - Limite haute:
 - V_{NO} .





La graduation de l'anémomètre

- Plages des vitesses et Utilisation de couleurs.
- Arc jaune:
 - Zone interdite en atmosphère turbulente.
 - Limite basse:
 - V_{no} : vitesse à ne pas dépasser en atmosphère turbulente.
- Limite haute,
 - Arc Rouge:
 - V_{ne} : vitesse à ne JAMAIS dépasser. Elle est symbolisée par un trait rouge.





Remarques complémentaires

- Au sol, les prises de pression statiques et dynamique doivent être protégées à l'aide des caches appropriés afin que les canalisations ne soient pas obstruées.



- Contrôle du fonctionnement de l'anémomètre par le pilote:
 - Au décollage, le pilote doit vérifier l'anémo, et annoncer "badin actif »
- Particularités du tube de Pitot:
 - Par conditions givrantes, cette sonde peut-être recouverte de glace. Brancher le réchauffage pitot.
 - Attention, c'est un gros consommateur d'électricité.



Le variomètre

Vertical Speed Indicator (VSI)

Donne une information de vitesse verticale : la VZ



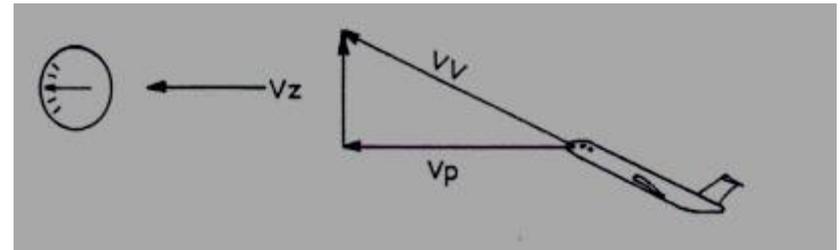
Rappels

- Taux de montée / Taux de descente
 - Vitesse verticale : V_z de l'avion.
 - C'est la composante verticale de la vitesse de l'avion par rapport à l'air
 - $VZ = \text{vitesse vraie (VV)} \times \sin \text{pente air}$
 - Mesure du taux de variation de la pression statique dans le temps :

$$\frac{\Delta P_s}{\Delta t} = \frac{P_s(t) - P_s(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

– Avec

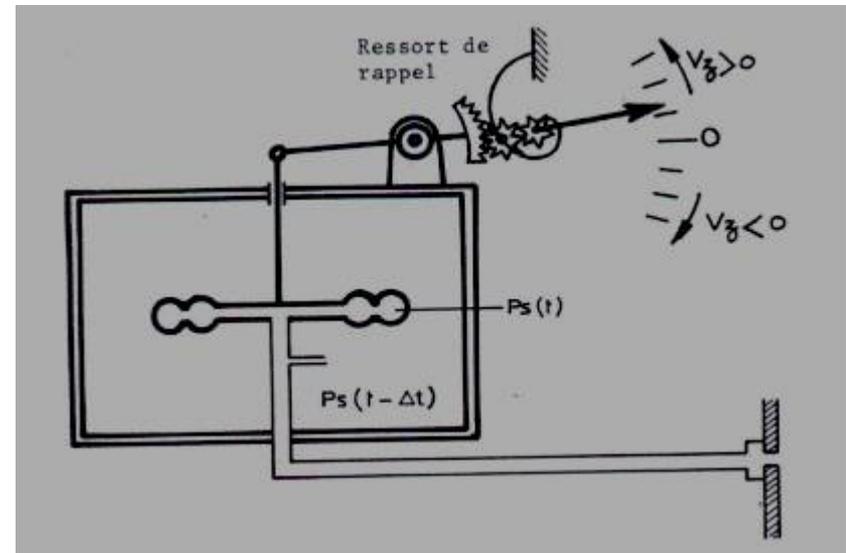
- $P_s(t)$ = pression statique instantanée
- $P_s(t - \Delta t)$ = Pression statique d'un instant antérieur





Principe de fonctionnement

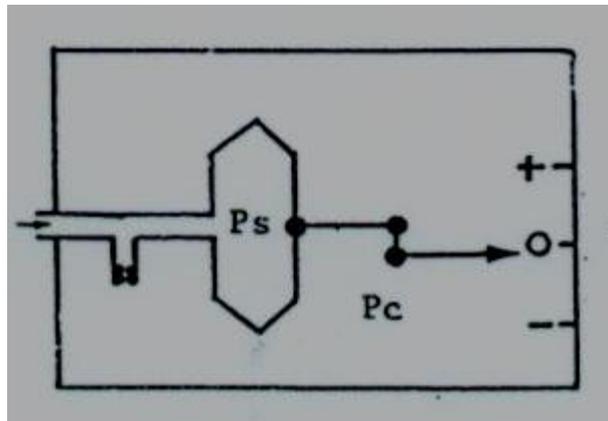
- Il utilise une capsule anéroïde (de Vidie) qui se déforme sous l'action d'une variation de pression ΔP_s .
 - Le variomètre est un **manomètre différentiel**
- Il fonctionne grâce aux prises de pression statique $P_s(t)$ située sur la partie latérale du fuselage





Les différentes phases de vol :

- Le palier
 - $P_s(t)$ constante dans la capsule
 - $P_s(t-\Delta t)$ constante dans le boîtier
 - La déformation de la capsule est nulle
 - Cadran = 0

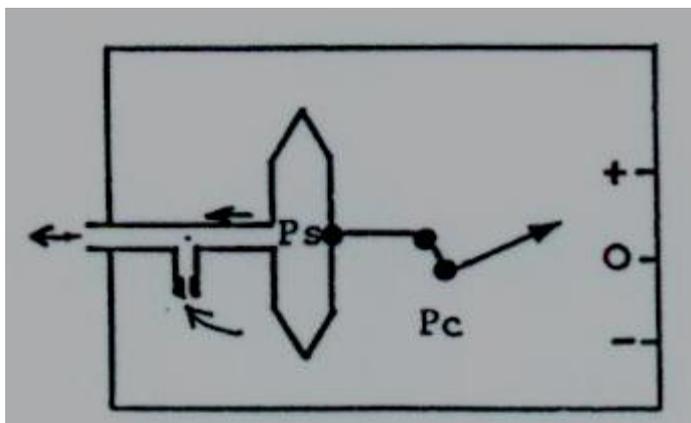


$$P_c = P_s$$



Les différentes phases de vol :

- la montée
 - $P_s(t)$ décroît dans la capsule
 - $P_s(t-\Delta t)$ décroît moins vite dans le boîtier
 - La capsule se déforme : il ya écrasement,
 - Le cadran passe en positif

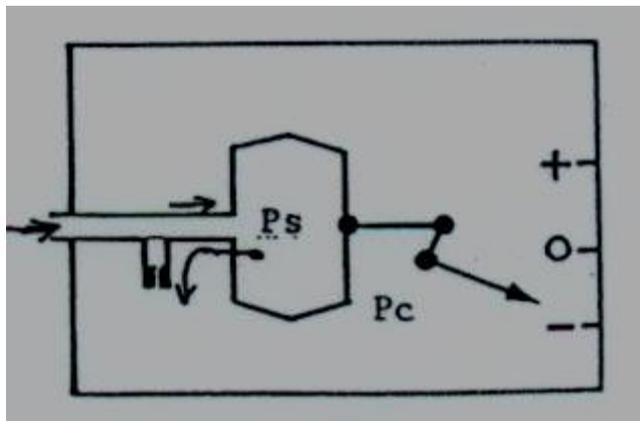


$$P_c > P_s$$



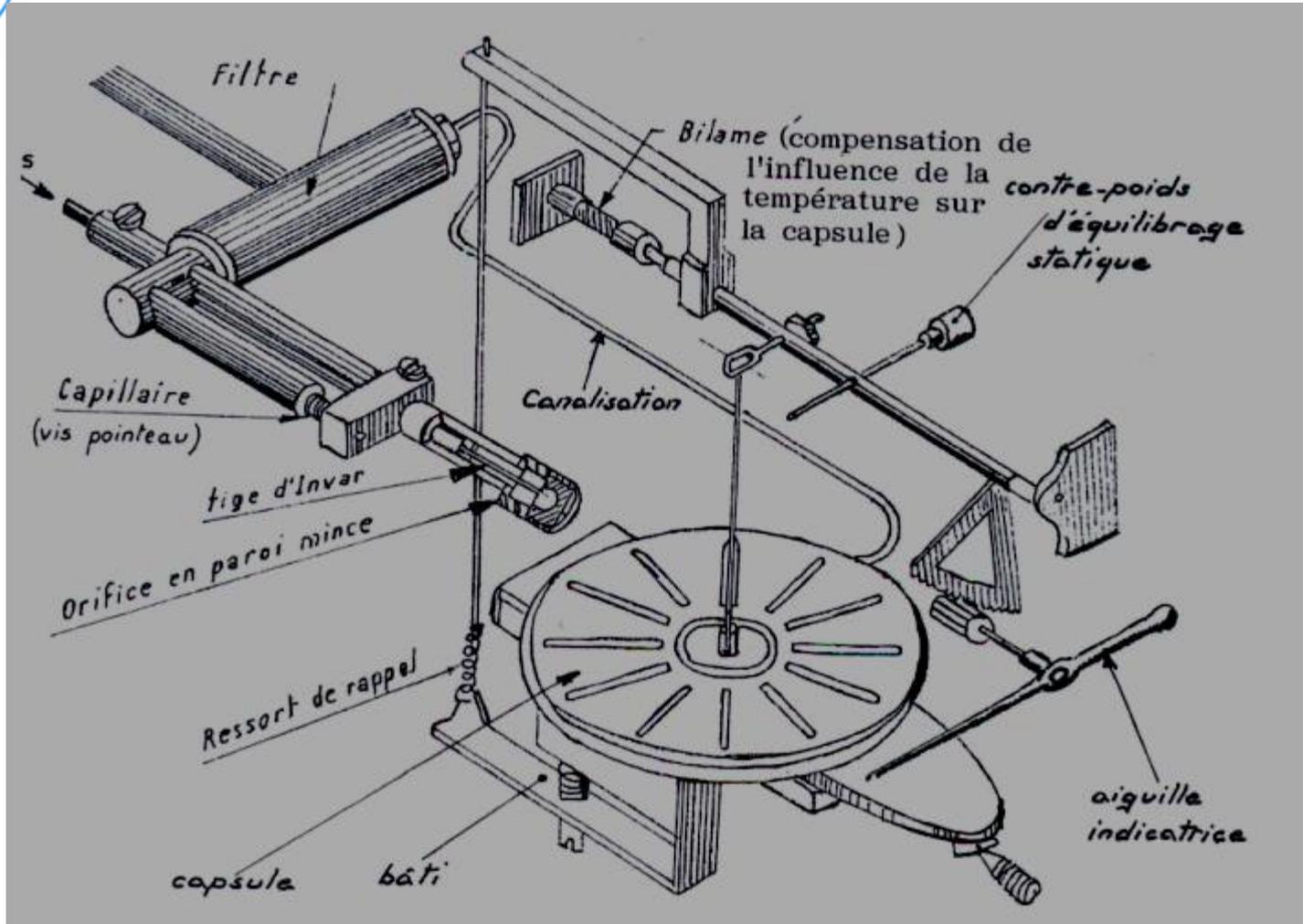
Les différentes phases de vol :

- la descente
 - $P_s(t)$ croît dans la capsule
 - $P_s(t-\Delta t)$ croît moins vite dans le boîtier
 - Il y a déformation de la capsule, il y a écrasement
 - Le cadran passe en négatif



$$P_c < P_s$$

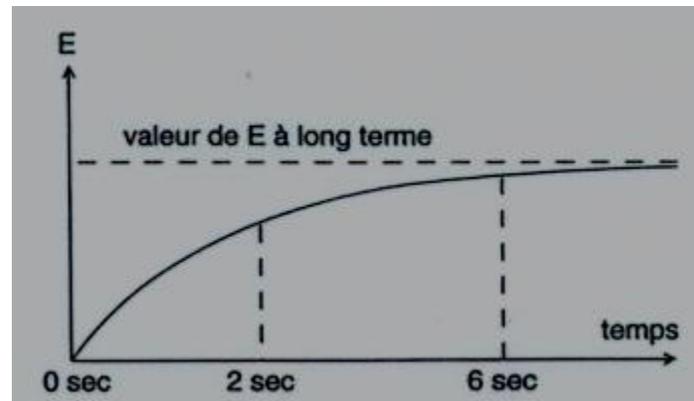
L'instrument





L'instrument

- Le variomètre est un instrument dit "à retard"
 - En début d'évolution, le variomètre a besoin d'un laps de temps pour réaliser la mesure \Rightarrow **imprécis à court terme**



- En atmosphère standard, en montée ou descente **stabilisée**, c'est-à-dire à V_z constante, la vario mécanique est un instrument fiable \Rightarrow **précis à long terme**



Les erreurs du variomètre:

- Erreur instrumentale
 - Retard à l'indication (5 à 6 secondes)
 - Problème de l'isolement thermique du boîtier
 - $\Rightarrow 1^{\circ}\text{C}/\text{min} \Leftrightarrow 100 \text{ ft}/\text{min}$ d'erreur
- Erreur de principe
 - La masse volumique ρ de l'air diminue avec l'altitude. Or, l'appareil est réglé pour une valeur constante ρ_0 standard au sol
 - \Rightarrow erreur en altitude de $\pm 10 \%$ de la valeur indiquée.
 - La température de l'air modifie sa viscosité, ce qui provoque une modification du retard apportée par la fuite capillaire en altitude.



Rappel : QNH, QFE, FL

- Définitions:
 - Le QNH est basé sur une altitude par rapport au niveau la mer
 - Le QFE est mesuré par la hauteur au sol local
 - Le FL (niveau de vol) est une référence internationale : 1013.25 Hpa
- Comment déterminer une altitude ?
 - Que dit la statique des fluides :

$$dPs = - \rho \cdot g \cdot dZ$$

variation de pression

variation d'altitude

masse volumique de l'air

accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ ms}^2$

Nota : PS est la Pression Statique ou Pression Atmosphérique ou Pression Ambiante



L'altimètre

Donne une indication d'Altitude : Z

La référence est réglable pour choisir entre l'Altitude, La Hauteur, le Niveau



Atmosphère standard

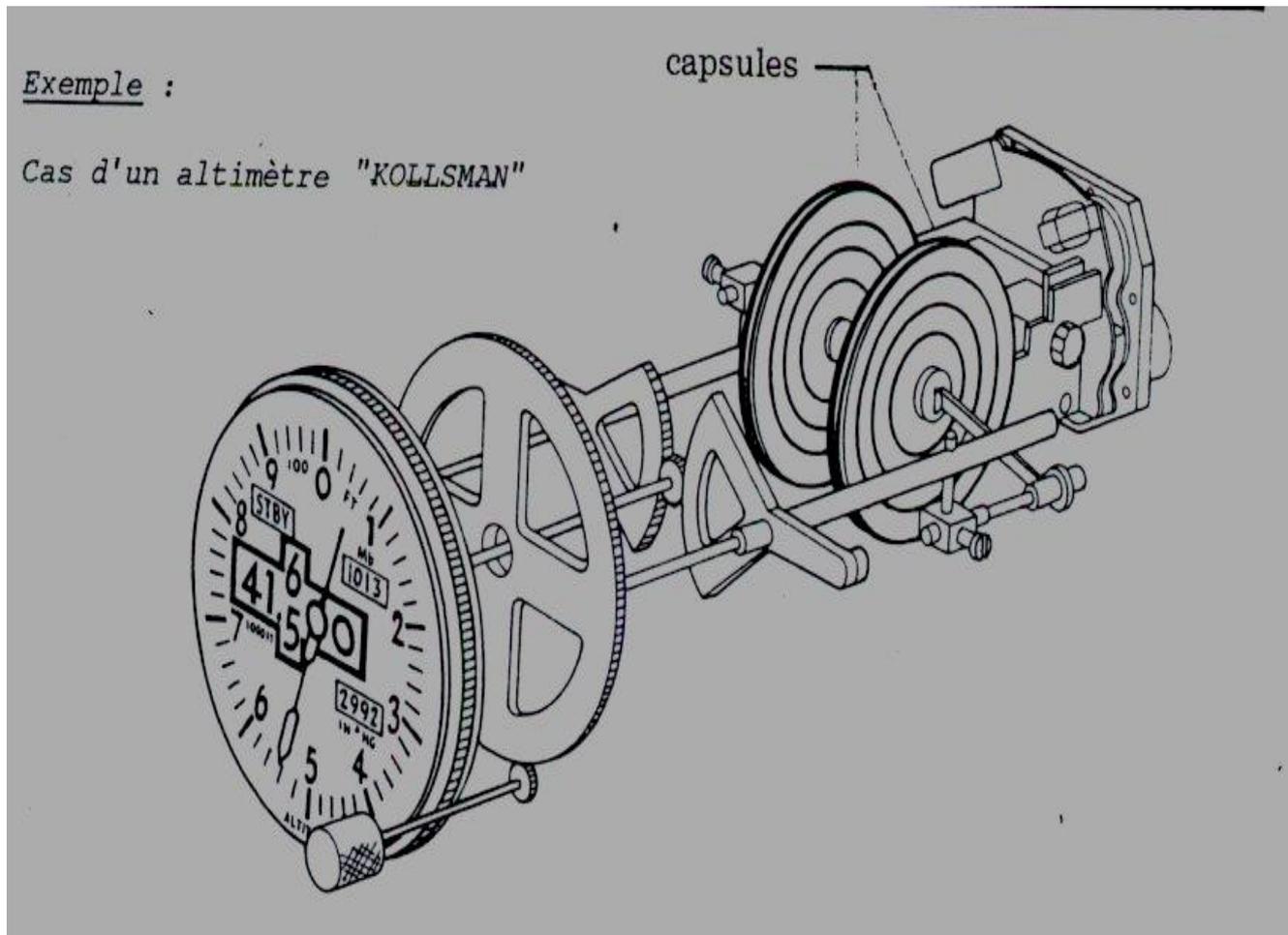
- Rappel :
 - Altitude $Z = 0$
 - Température = 15 °C
 - Pression atmosphérique = 1013,25 hPa
- Règles de variation
 - La température décroît
 - de 2° / 1.000 ft, ou 6,5 °C / 1000 m
 - Entre 950 hPa et 1050 hPa (près du sol) :
 - la variation de pression avec l'altitude est considérée linéaire : 1 hPa \Leftrightarrow 28 ft
- Exercice pratique : le cas du transpondeur.
 - Au sol le transpondeur affiche -280 ft, pourquoi ?
 - Il est calé sur 1013.25 Hpa,
 - Un simple calcul permet de déterminer la pression locale:
 - $280 \text{ ft} / 28 = 10 \text{ hPa}$, soit une pression locale de 1.003



Eclaté d'un altimètre

Exemple :

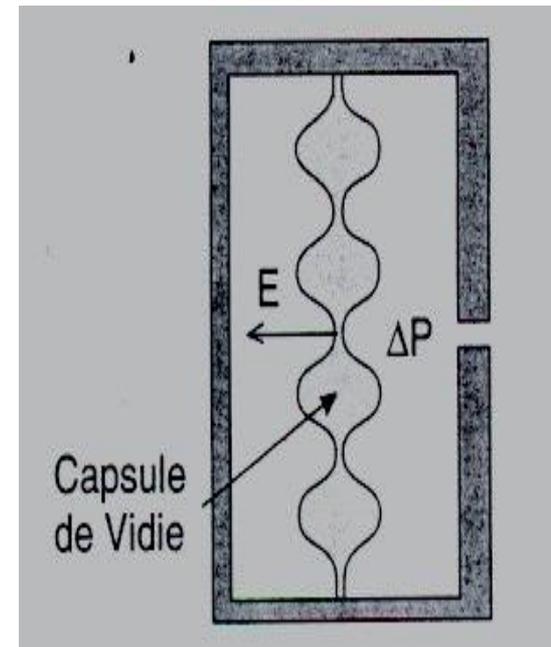
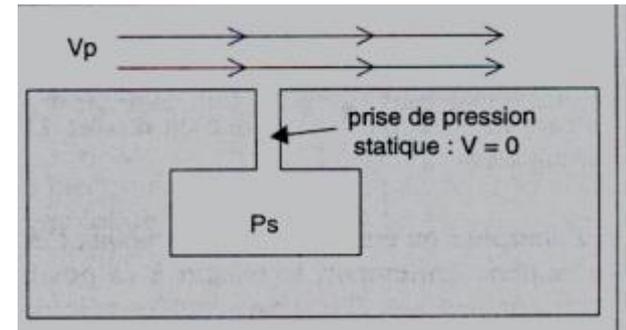
Cas d'un altimètre "KOLLSMAN"





La pression Statique

- Schéma d'une prise de pression statique
- Principe de fonctionnement :
 - Une capsule en métal très fin.
 - Vide intérieur.
 - Déformable sous l'effet des changements de pression.
 - Dans un boîtier soumis à la pression à mesurer.
 - La variation de pression ΔP déforme la capsule ce qui implique une élongation E



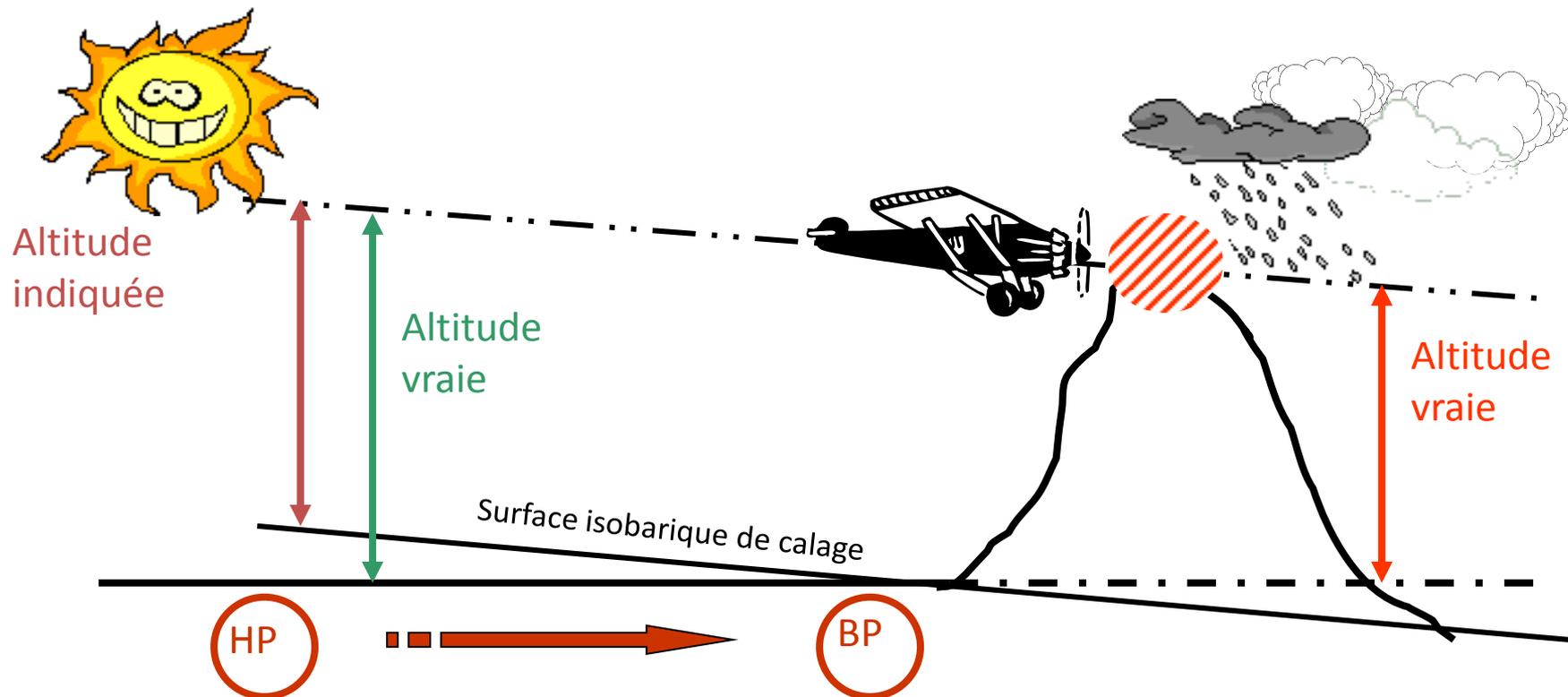


Les erreurs instrumentales

- Influence de la température : dilatation de (ou des) capsule(s)
- Erreurs dues aux frottements : résistance aux mouvements d'éléments du mécanisme
- Erreurs dues aux prises statiques et à leur emplacement
- Problème d'étalonnage ou d'étanchéité
 - *Nota : une tolérance de 3 hPa est en tant qu' erreur instrumentale entre le QFE ou le QNH donné par les services de contrôle et le QFE ou QNH lu sur l'altimètre au sol, et indiquant 0 ft/ altitude du terrain*



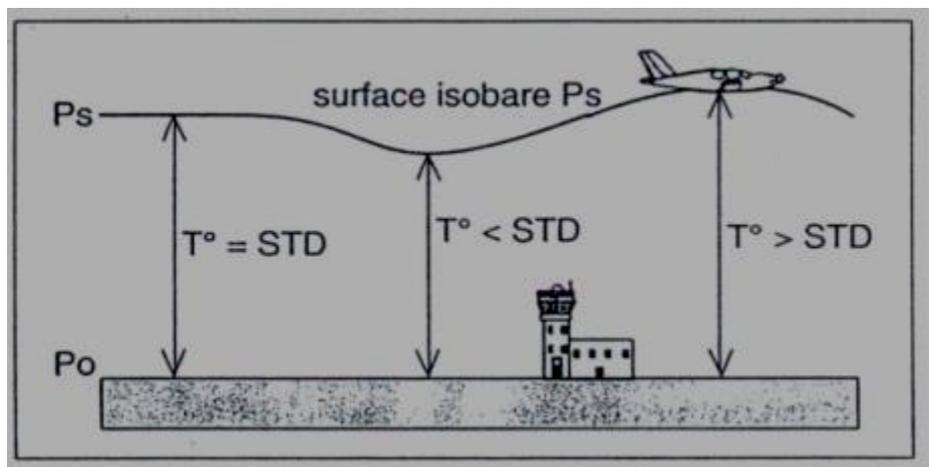
Erreurs dues à la pression



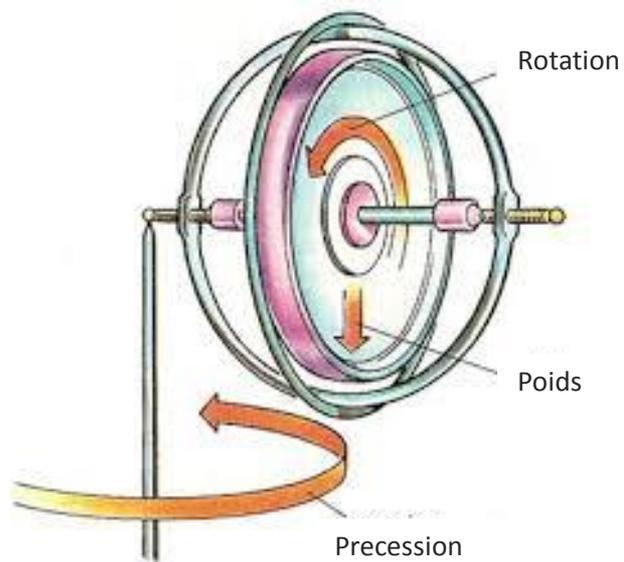


Erreurs dues à la température

- Plus l'air est froid, plus la distance entre 2 niveaux de vol est faible et inversement



- Donc la variation est de
 - + / - 4% par +/- 10°C d'écart t° standard
- Exemple pratique : Z lue = 7000 ft t° lue 15°
 - Quelle est l'altitude (Z) réelle ?



Le gyroscope

Outil essentiel au pilote

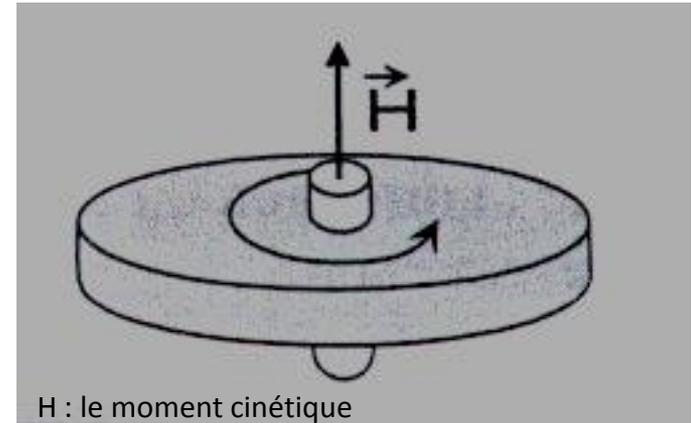
Le connaître c'est comprendre le fonctionnement de nos instruments



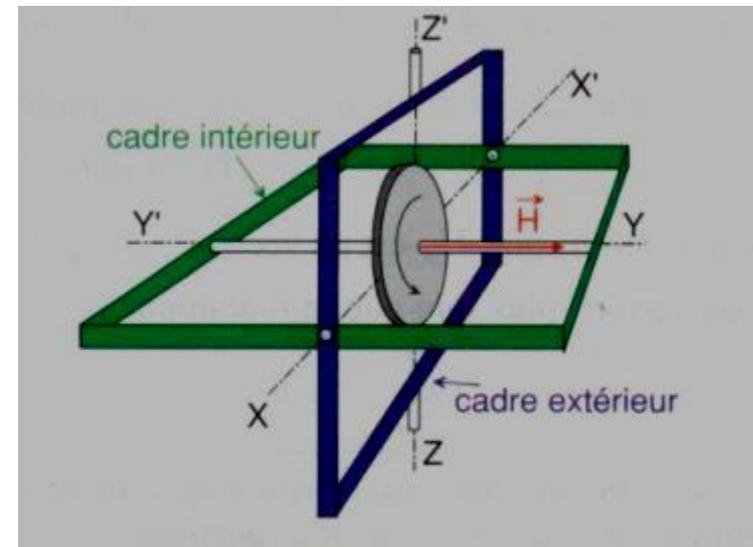
Le gyroscope

- Définition :
 - Un gyroscope est un solide de révolution animé d'un mouvement de rotation rapide autour de son axe de symétrie.

- Différents modes de suspension
 - Le gyroscope peut jouir de plusieurs degrés de liberté (de 1 à 3).



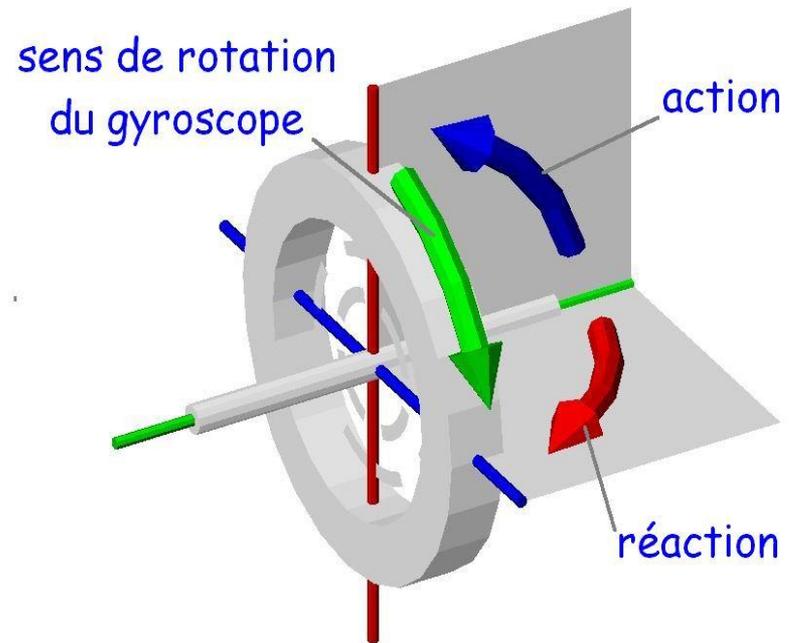
H : le moment cinétique





La precession

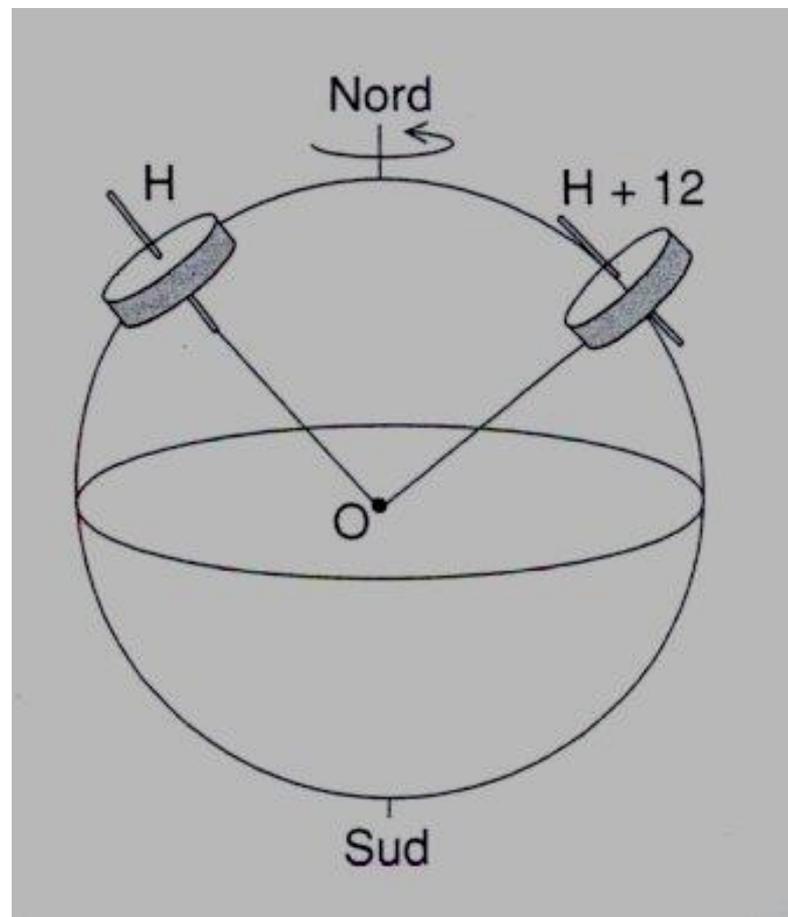
- Si l'on soumet un gyromètre (à 2 degrés de liberté) à une perturbation (rotation), il réagit par un couple gyroscopique tendant à amener son axe sur celui de la rotation perturbatrice.
- On dit que le gyroscope précessionne à $\pi/2$.





Influences

- Influence de la rotation terrestre :
 - Cas d'un gyroscope orienté initialement selon la verticale terrestre locale
 - La terre tournant, le gyroscope continuant d'indiquer la même direction il va perdre la verticale terrestre
 - Rappel : La terre tourne de $15^\circ/h$
- Fixité du Gyroscope :
 - Le gyroscope génère des erreurs lors :
 - Du déplacement de l'avion
 - De rotation de la Terre
 - On ne peut alors connaître en permanence la verticale du lieu.
Comment faire ?
 - On recale en permanence le gyroscope en le comparant avec un système lié à la pesanteur terrestre

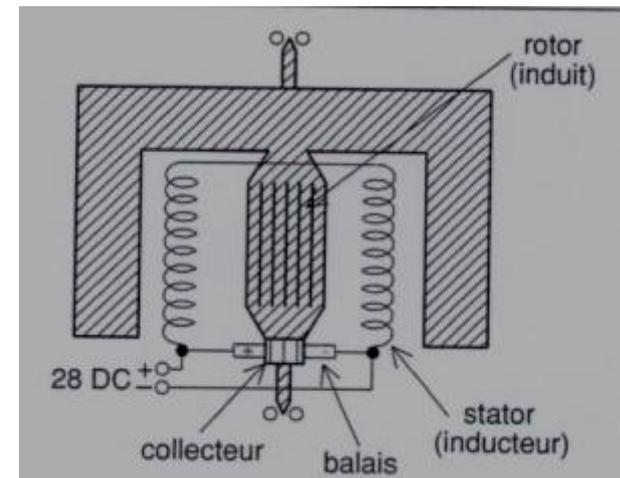
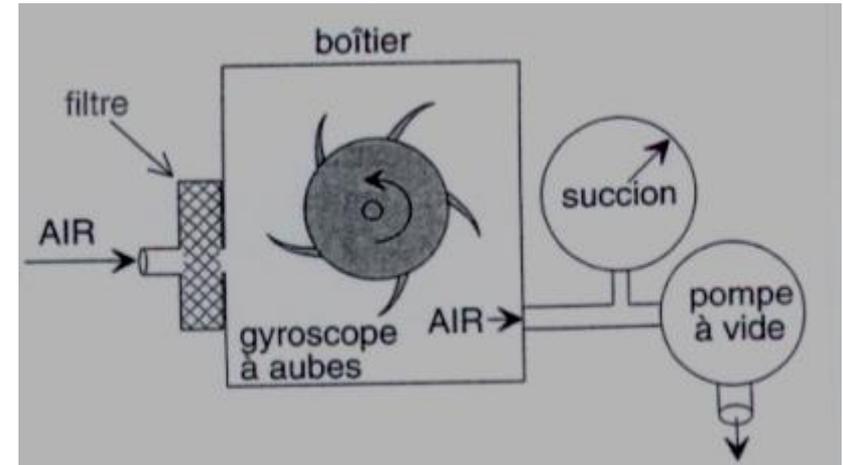




Différents types de gyroscopes

- Entraînement pneumatique:
 - Une pompe à vide génère un débit d'air et une dépression dans le boîtier contenant le gyroscope.
 - Le débit d'air entraîne les aubes du gyroscope, ce qui génère sa rotation : 10.000 tours/min

- Entraînement électrique:
 - Principe du Rotor/Stator
 - Moteur à courant continu : 12 à 15.000 tours/min
 - Moteur à courant alternatif : 24000 tours / min





La bille aiguille

C'est le 1^{er} instrument du pilote,
C'est aussi le plus ancien



L'indicateur de virage

Comprends 2 instruments distincts



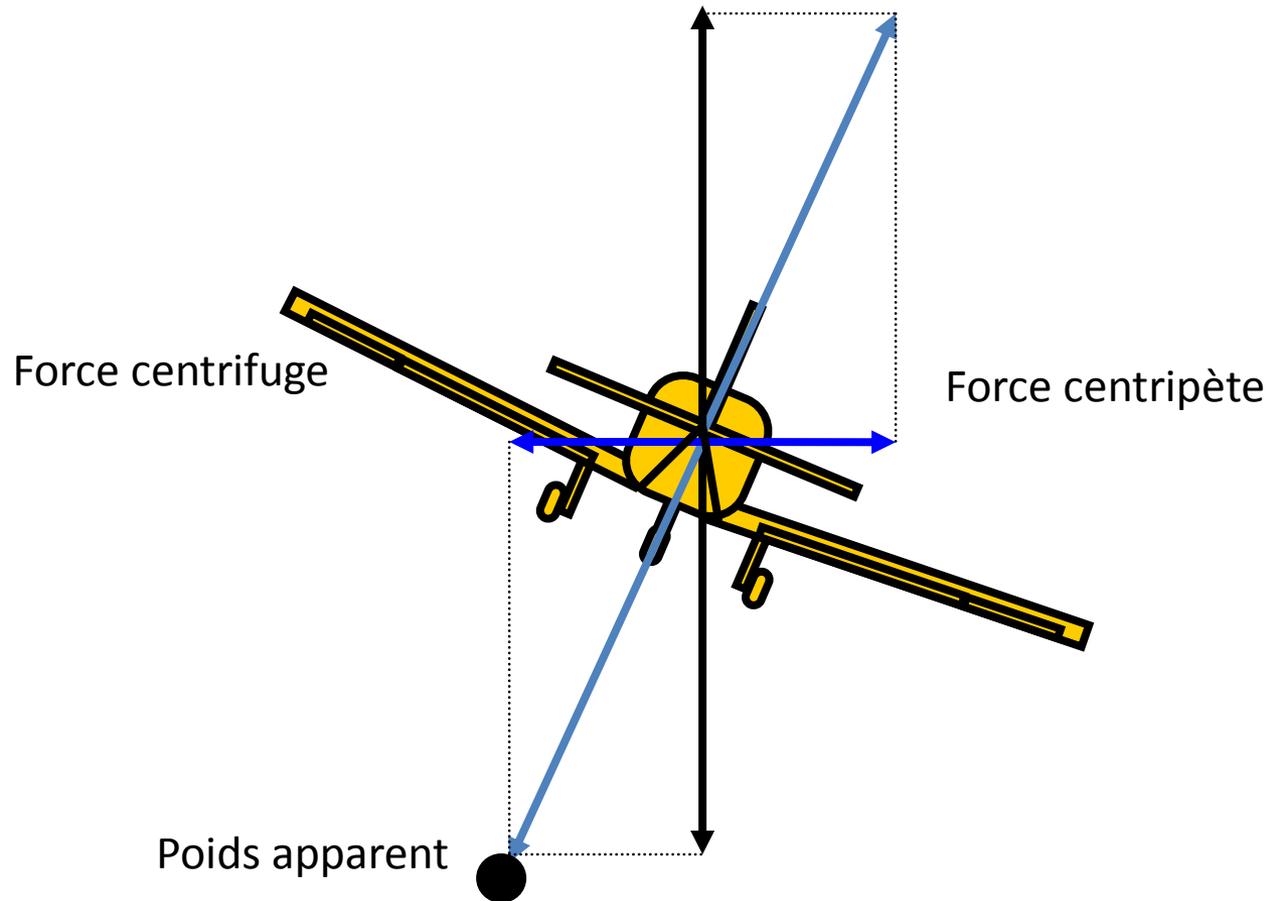
la bille

l'aiguille

- Système pendulaire qui permet de contrôler que le vol de l'avion est symétrique
- Gyroscope à 2 degrés de liberté qui détecte tout virage, en indiquant sommairement la vitesse angulaire ou taux de virage



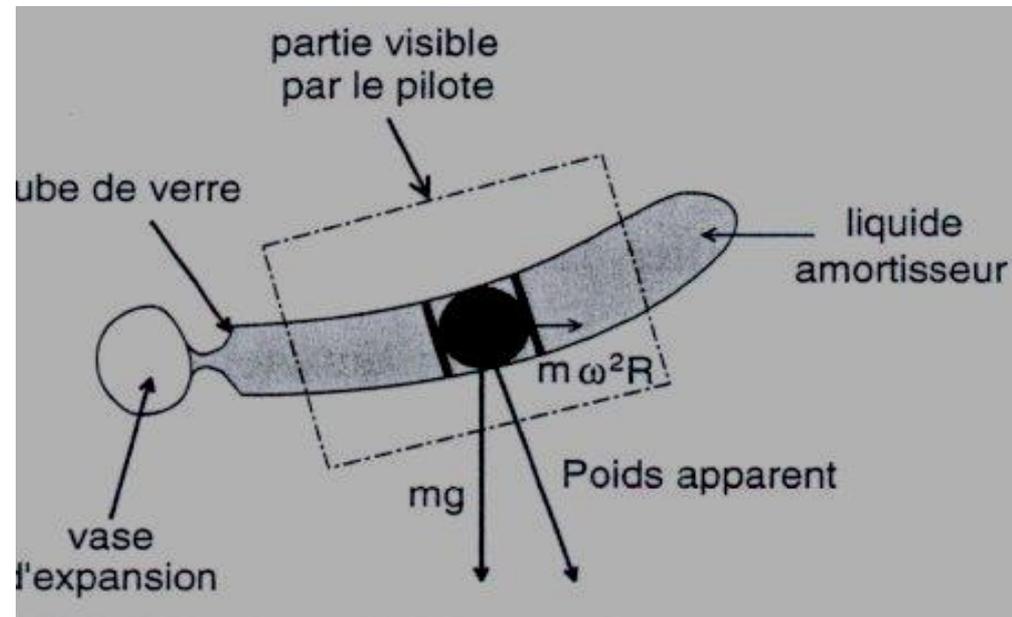
L'utilité de la bille





La bille

- Elle indique au pilote si son vol (en palier ou en virage) est symétrique,
 - C'est-à-dire si la verticale apparente est confondue avec l'axe de lacet de l'avion.
- La bille s'aligne suivant la direction du poids apparent
 - C'est la résultante du poids et de la force centrifuge
- Pour que le virage soit symétrique, le poids apparent doit être dirigé selon l'axe de lacet de l'avion

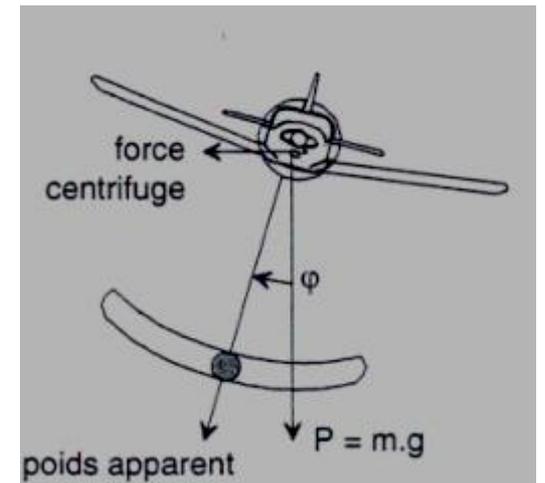
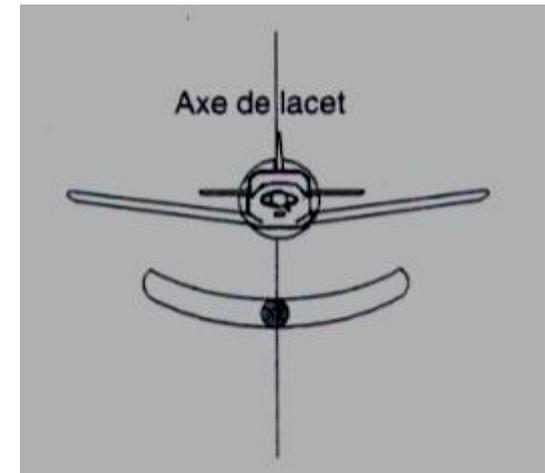


⇒ Indicateur de dérapage



Utilisation de la bille

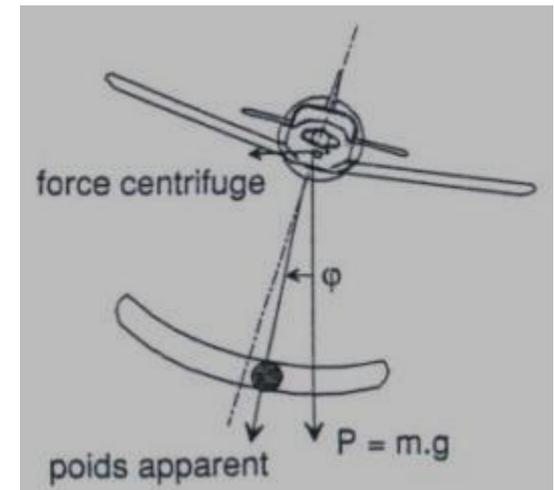
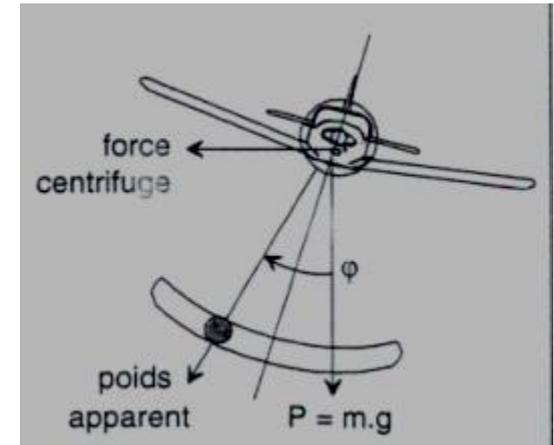
- L'avion est en palier, en vol symétrique, la portance et le poids sont alignés
 - La bille reste au milieu
- L'avion est en virage à gauche, la direction du poids apparent est confondue avec celle de l'axe de lacet de l'avion
 - La bille reste au milieu





Utilisation de la bille

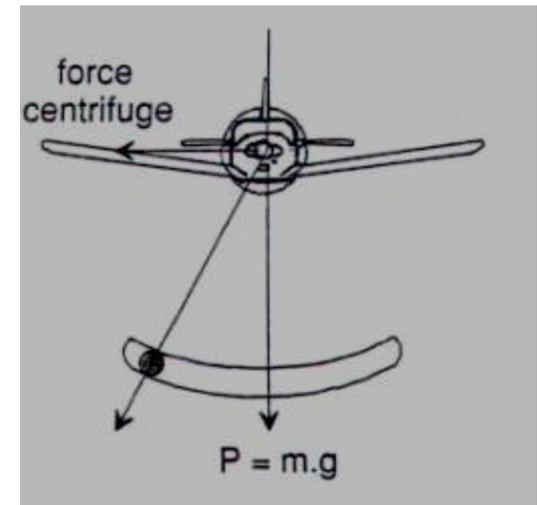
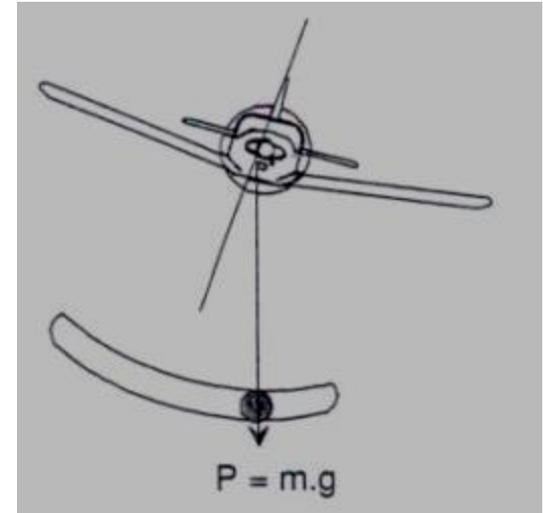
- Le poids apparent n'est pas dirigé suivant l'axe de lacet. La force centrifuge est trop forte. La bille part à l'extérieur du virage.
 - Le virage est dérapé extérieur
- Le poids apparent n'est pas porté par l'axe de lacet, la force centrifuge est trop faible. La bille est à l'intérieur du virage.
 - Le virage est dérapé intérieur





Utilisation de la bille

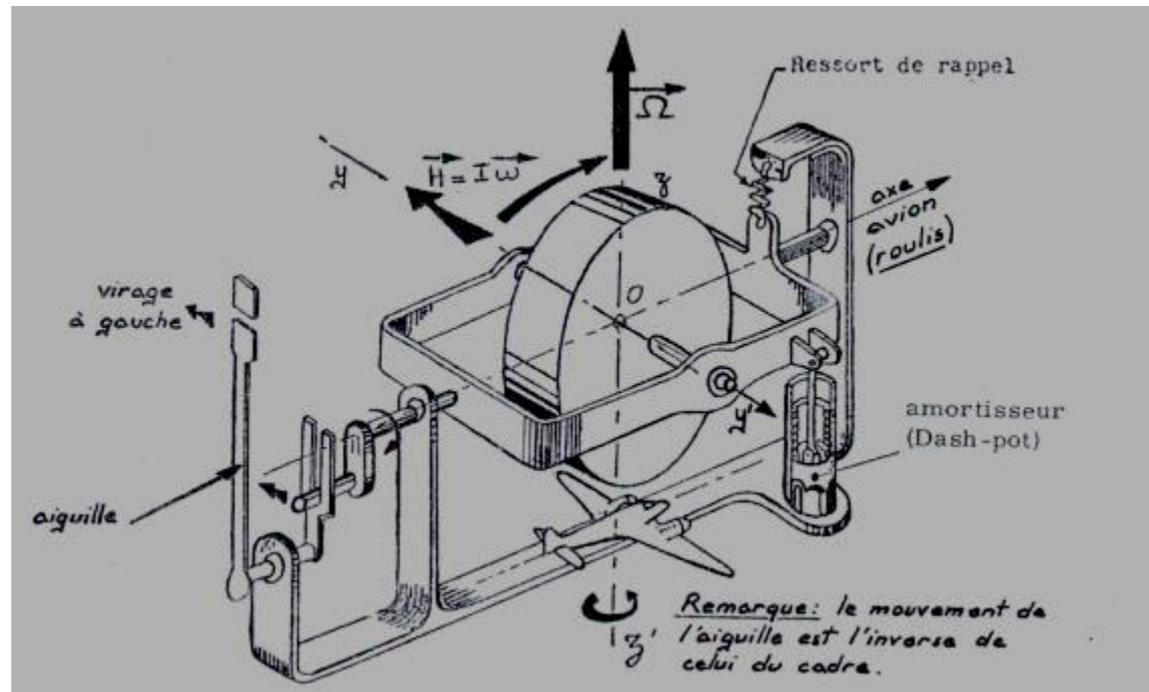
- L'avion est en vol rectiligne incliné. Il n'y a pas de force centrifuge,
 - la bille "tombe" du côté de l'aile basse
- L'avion effectue un virage à plat. La bille part à l'extérieur du virage
 - Le virage est dérapé intérieur





Fonctionnement de l'Aiguille

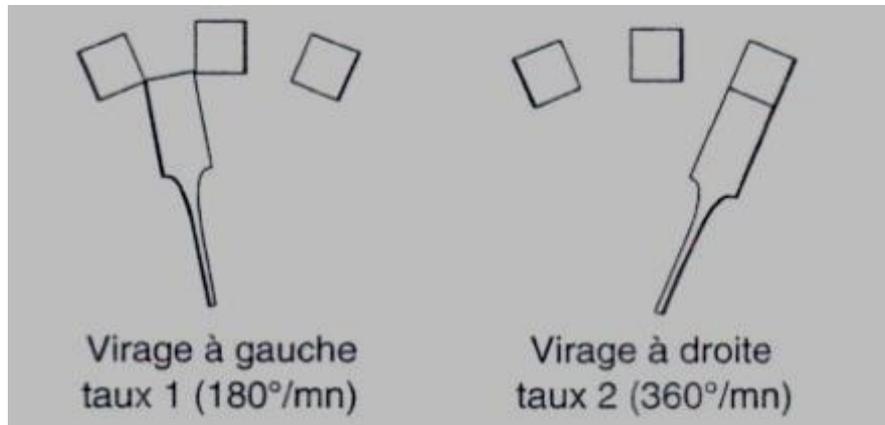
- « L'aiguille » est un gyroscope à 2 degrés de liberté (gyromètre) à moment cinétique parallèle à l'axe de tangage,
- Soumis à un couple gyroscopique en virage le basculement du cadre retransmis mécaniquement à une aiguille indicatrice.





L'aiguille

- L'aiguille s'incline du côté du virage.
- Elle indique la cadence, ou taux de virage, et le sens du virage.
 - La largeur de l'aiguille = taux de virage "unitaire"



- Le taux de virage
 - Le taux de virage est la vitesse angulaire du virage, c'est-à-dire le rapport :
$$\frac{\alpha \text{ (degrés parcourus)}}{t \text{ (temps de parcours)}}$$
- Cela définit le Taux Standard
 - soit 180°/min (ou 3°/s)



Vérification avant vol

- Au roulage,
 - Lors d'un virage **vers la gauche au sol**, l'aiguille doit être à gauche et la bille à droite.
 - Lors d'un virage **vers la droite au sol**, l'aiguille doit être à droite et la bille à gauche



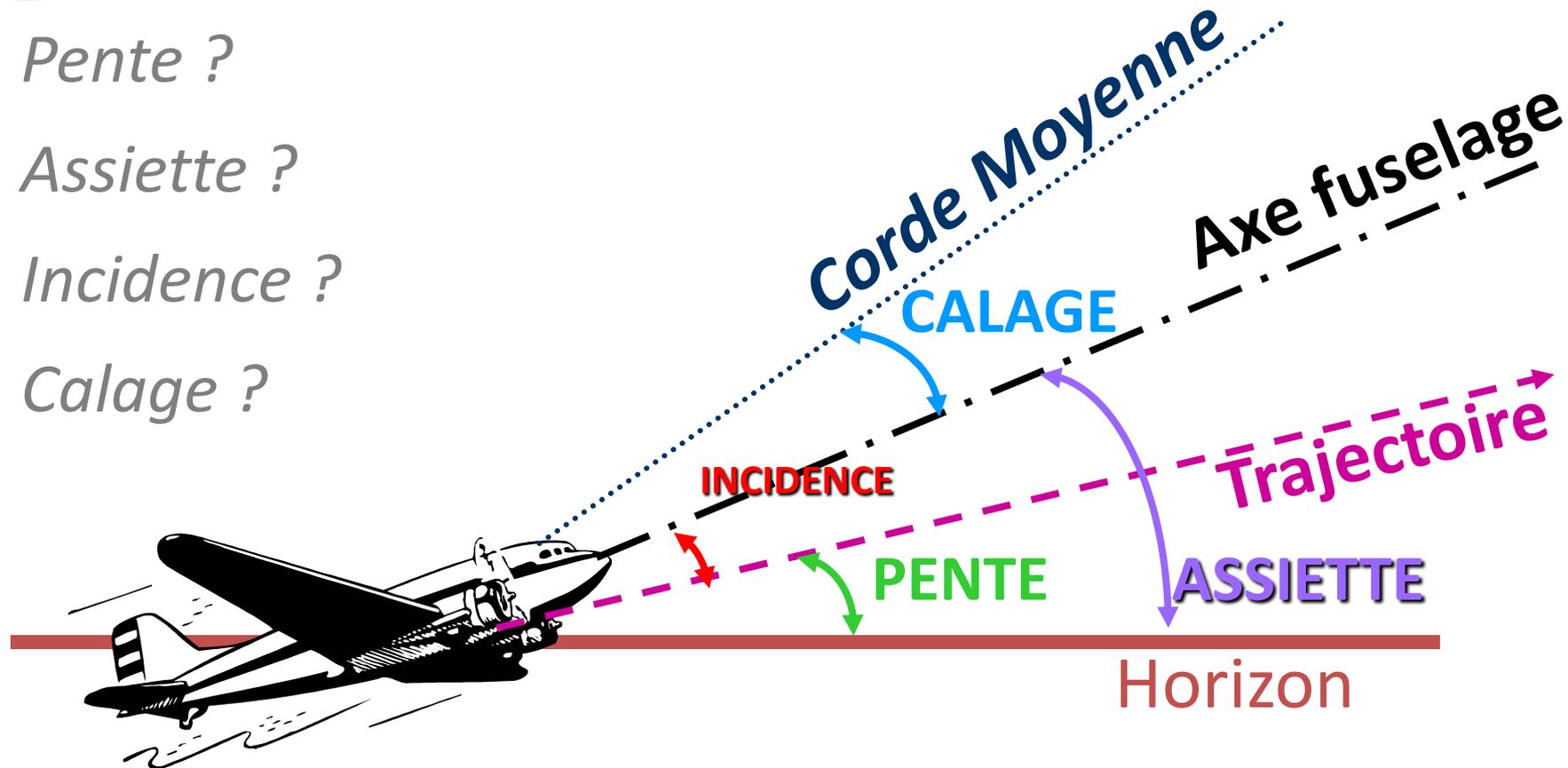
L'Horizon Artificiel

Il permet d'avoir sur le tableau de bord une référence fiable
L'Horizon Artificiel est un Gyroscope



Rappel : assiette et incidence

- Pente ?
- Assiette ?
- Incidence ?
- Calage ?





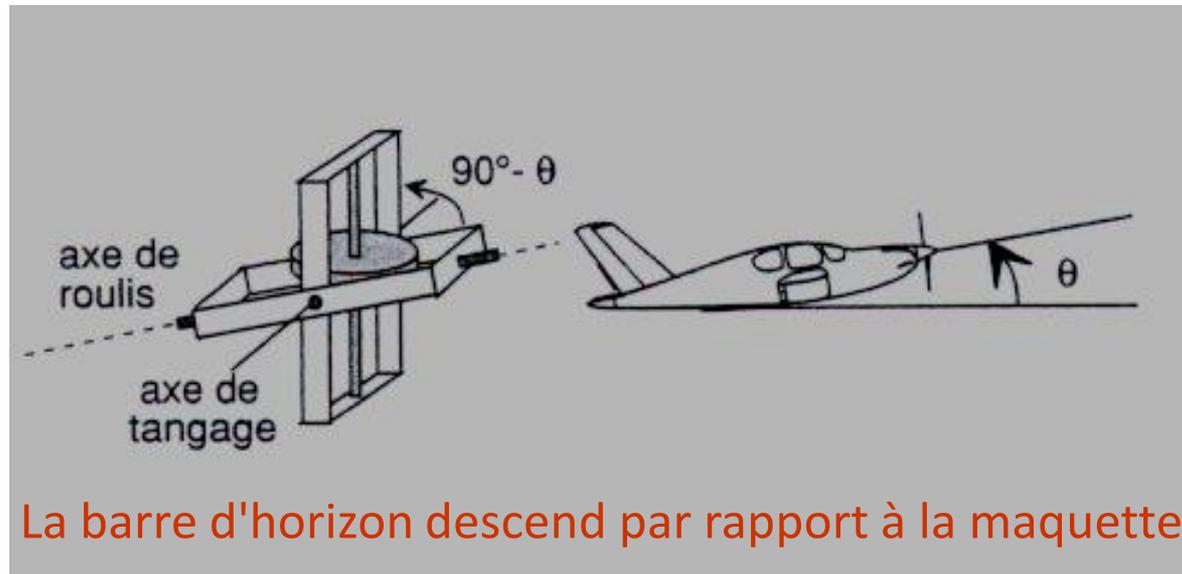
Fonctionnement

- L'horizon artificiel est un gyroscope à trois degrés de liberté calé sur la verticale terrestre appelé Vertical Gyro (VG).
- Axe du cadre intérieur \Leftrightarrow axe de tangage
- Axe du cadre extérieur \Leftrightarrow axe de roulis



Fonctionnement

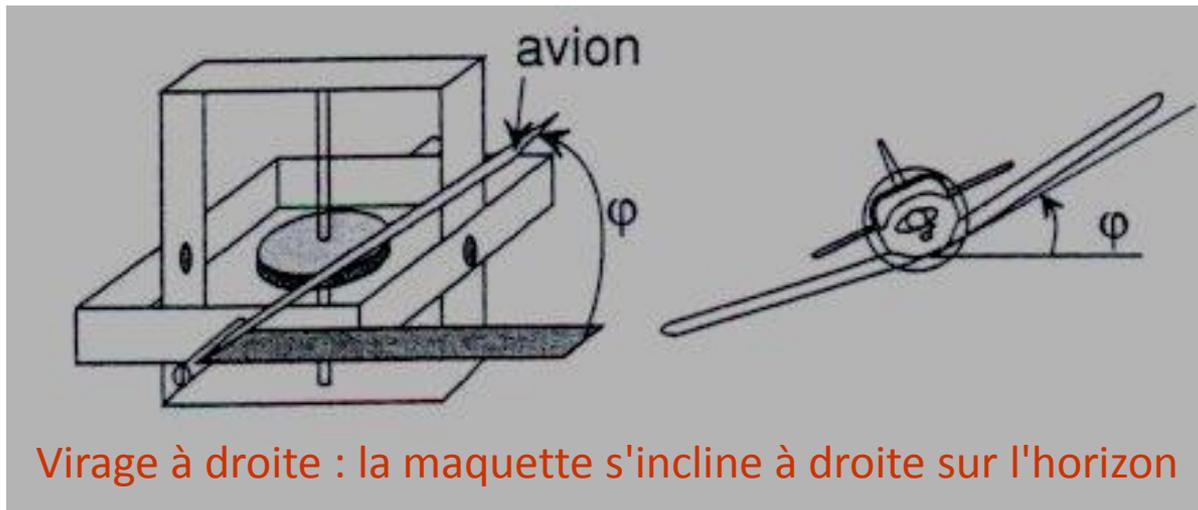
- Si l'avion est cabré,
 - le cadre intérieur étant solidaire du gyro, il reste fixe donc vertical.
 - Le cadre extérieur solidaire de l'axe de roulis a la même assiette que l'avion.
 - L'angle entre les 2 cadres est représentatif de l'assiette de l'avion





Fonctionnement

- Si l'avion s'incline,
 - l'ensemble des 2 cadres reste fixe dans l'espace par rapport à la maquette liée à l'avion.
 - L'avion lui est incliné et semble tourner autour de l'horizon.
 - En mesurant l'angle entre le cadre extérieur et l'avion \Rightarrow l'inclinaison φ



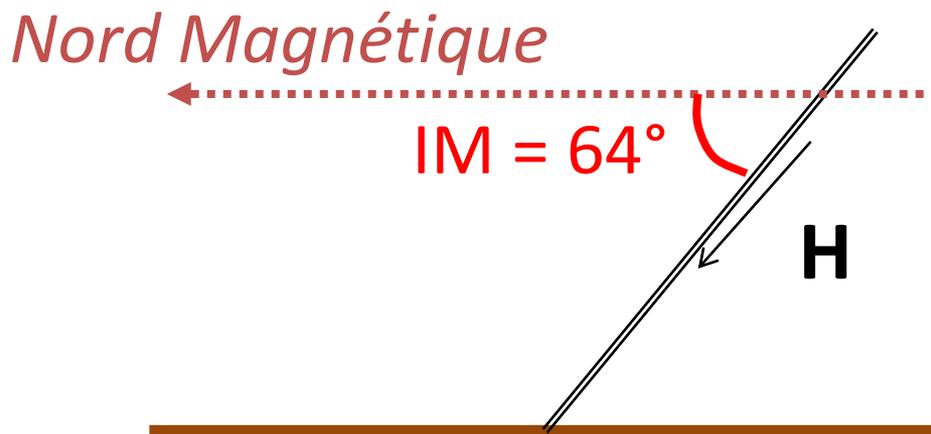


Le Compas Magnétique



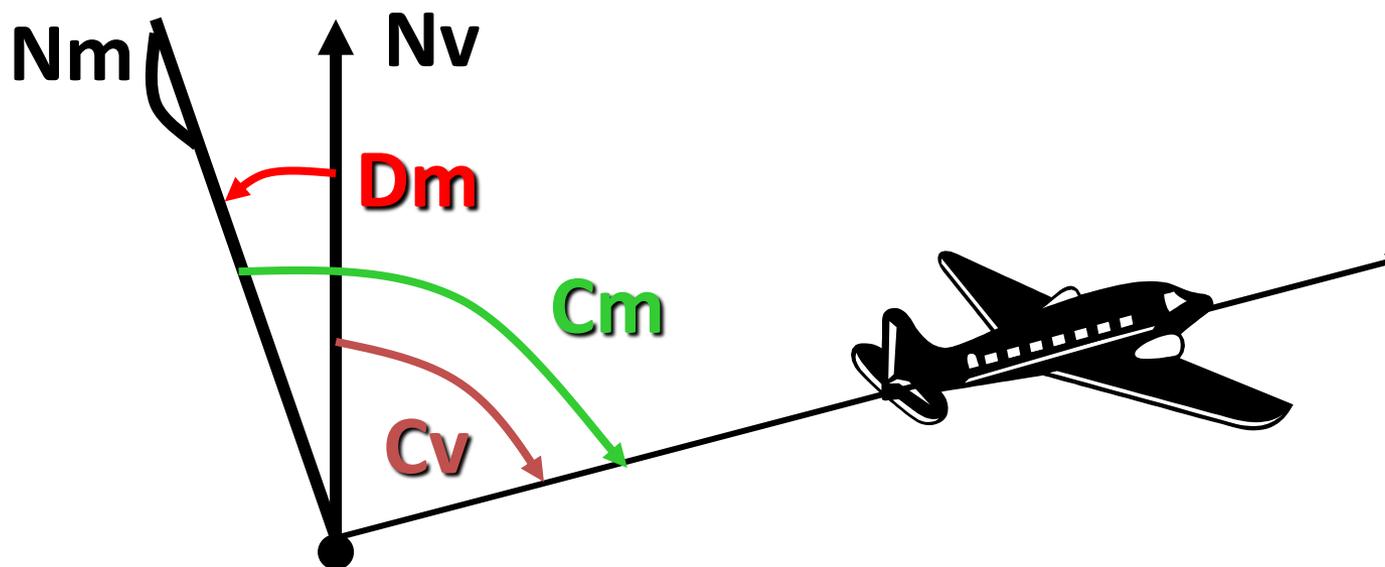
Le champ magnétique terrestre

- Les pôles magnétiques sont différents des pôles géographiques
- La direction des lignes du Cap Magnétique Terrestre est nommée méridien magnétique
- La terre est un aimant qui génère un champ magnétique du Sud vers le Nord.
- L'aiguille aimantée donne la direction du Nord, mais les lignes de champ magnétique ne sont pas toujours parallèles au sol.
 - A noter que l'aiguille aimantée s'incline de 64° vers le sol (en France)





Rappels sur la déclinaison magnétique



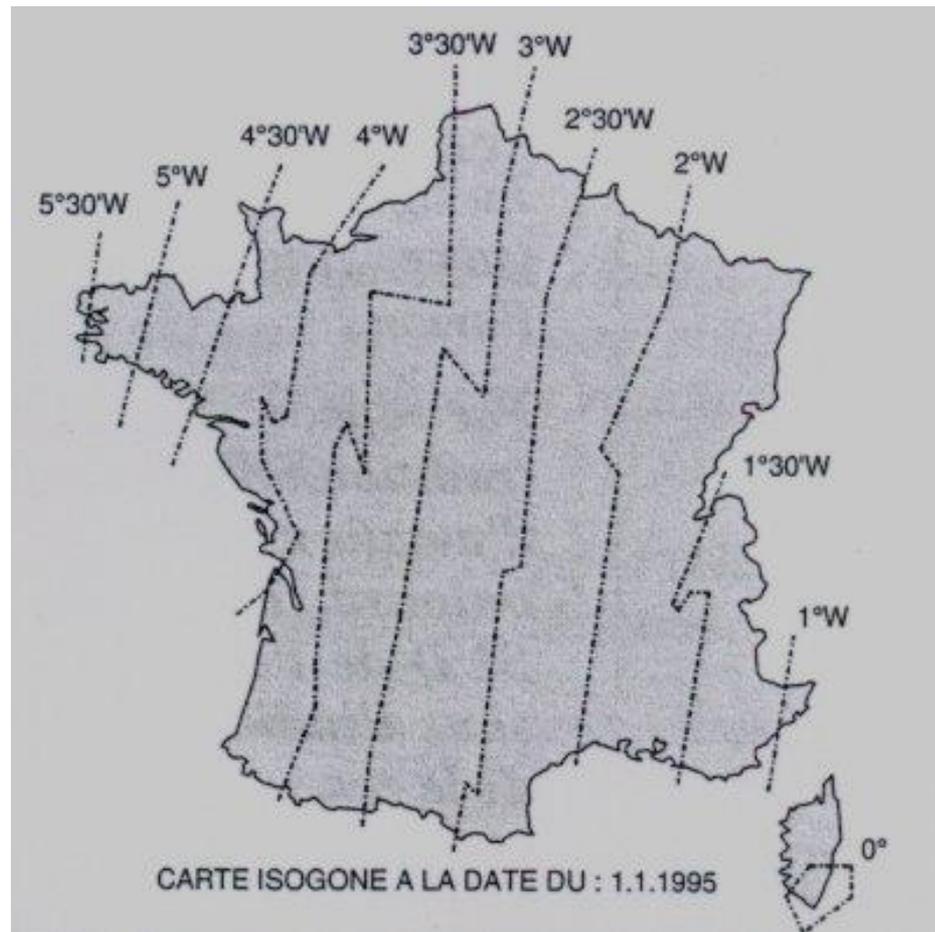
- La déclinaison magnétique est comptée
 - positive si Est, et négative si Ouest
- Sur ce schéma, la Dm est Ouest donc < 0



Rappels sur la déclinaison magnétique

Elle est fonction :

- Du lieu
- De la nature du sol
- De l'heure (variations diurnes)
- Des conditions météo (orages)
- De l'époque considérée,
 - la variation est de 8 minutes d'angle par an) donc la date est indiquée sur les cartes aéronautiques





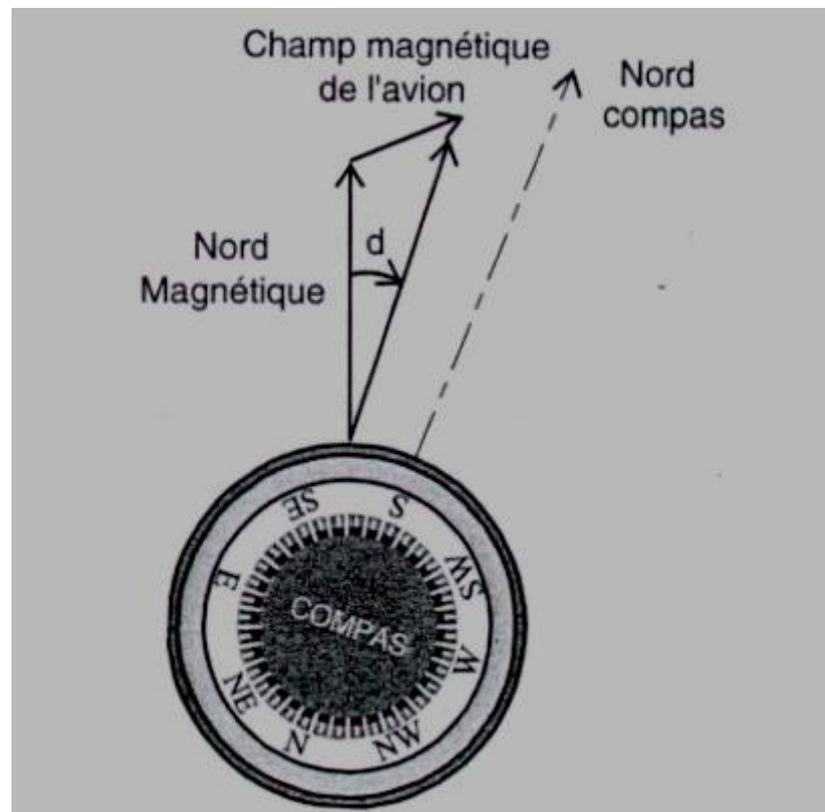
Perturbation du champ magnétique à bord

- Le CMT est perturbé à bord d'un avion par :
 - Des aimants,
 - Des courants électriques,
 - Des **fers durs** (fer et carbone) soumis à un champ magnétique atteignent la saturation magnétique.
 - L'aimantation d'un fer dur est permanente.,
 - Des **fers doux** (fer pur) qui soumis à un champ magnétique se comportent comme un aimant. Si le champ magnétique extérieur disparaît, l'induction disparaît également.
 - L'aimantation d'un fer doux est temporaire.
- Ils génèrent un champ magnétique local déviant le compas
 - Ne pas poser le casque sur la casquette ..

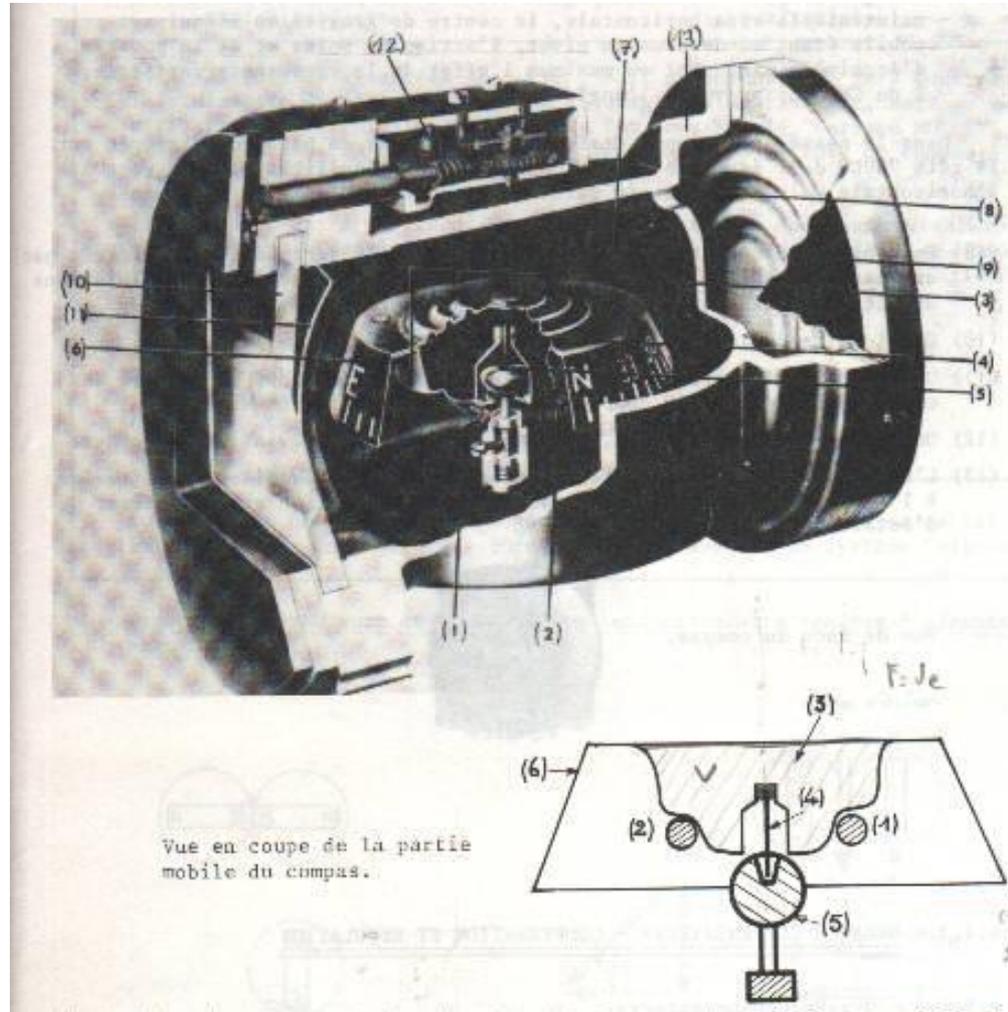


La déviation du compas

- Le compas indique la résultante entre le *Nord magnétique* et le *champs magnétique* de l'avion.
- La direction de la résultante est nommée *Nord Compas*
 - $d < 0$ ou W
 - $d > 0$ ou E



Le fonctionnement



Vue en coupe de la partie mobile du compas.



Erreurs du compas

- Le compas est inexploitable dans certaines configurations
 - Erreurs en virage.
 - Erreurs dues aux accélérations et décélérations
 - Erreurs en montée et descente
 - Erreurs lors des turbulences
 - Erreurs dues à des objets posés près du compas au GPS, Téléphone, casque, etc...
 - Erreurs dues aux phares, au pitot,
 - Etc ..



Le Conservateur de Cap

Donne des indications fiables lors des manœuvres

Affiche une lecture plus aisée des caps



Le Conservateur de Cap gyroscopique

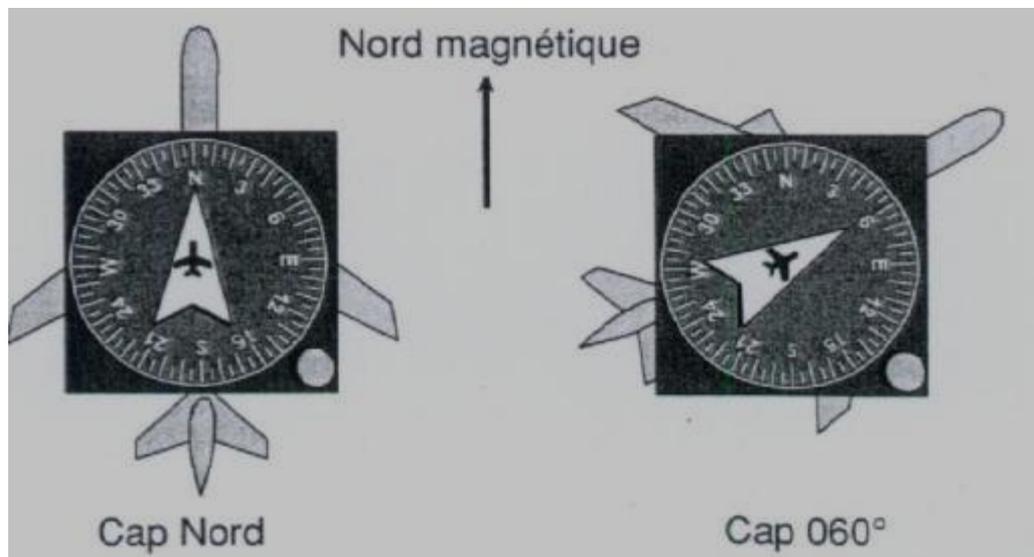
- Le Compas Magnétique
 - est relativement imprécis en lecture (instable, cap de 5° en 5°, ...)
- Le Conservateur de Cap
 - Permet de fournir un cap à peu près correct au cours des évolutions de l'avion (principe de fixité du gyroscope à 3 degrés de liberté).
 - Est incapable de s'orienter seul suivant une direction terrestre fixe.
 - Conserve un certain temps une direction (grâce au gyroscope) sur laquelle il a été calé.
 - Il présente suffisamment d'inertie pour ne pas être sensible aux perturbations et accélérations parasites.
 - Périodiquement, il doit être recalé manuellement sur le cap du compas magnétique.



Fonctionnement

- Le but est d'aligner l'axe du gyro vers le Nord Magnétique, de l'asservir à cette direction et enfin de permettre au pilote de visualiser son orientation ou son cap.
- L'axe de la toupie est confondu avec l'axe de tangage.

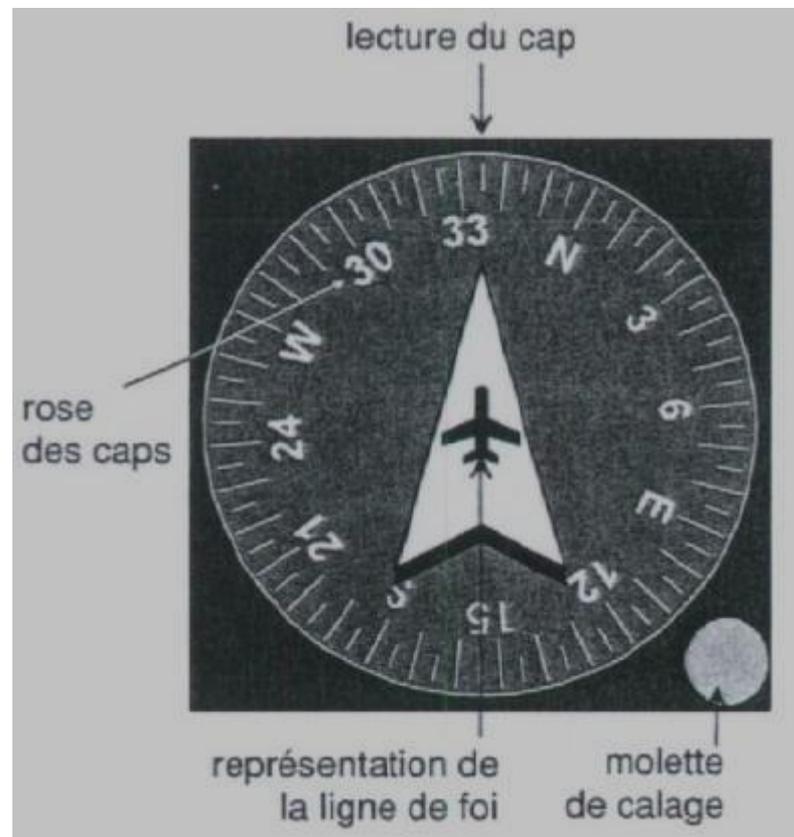
- Montage à la cardan.
- L'avion "tourne" autour du gyroscope.





Utilisation du Conservateur de Cap

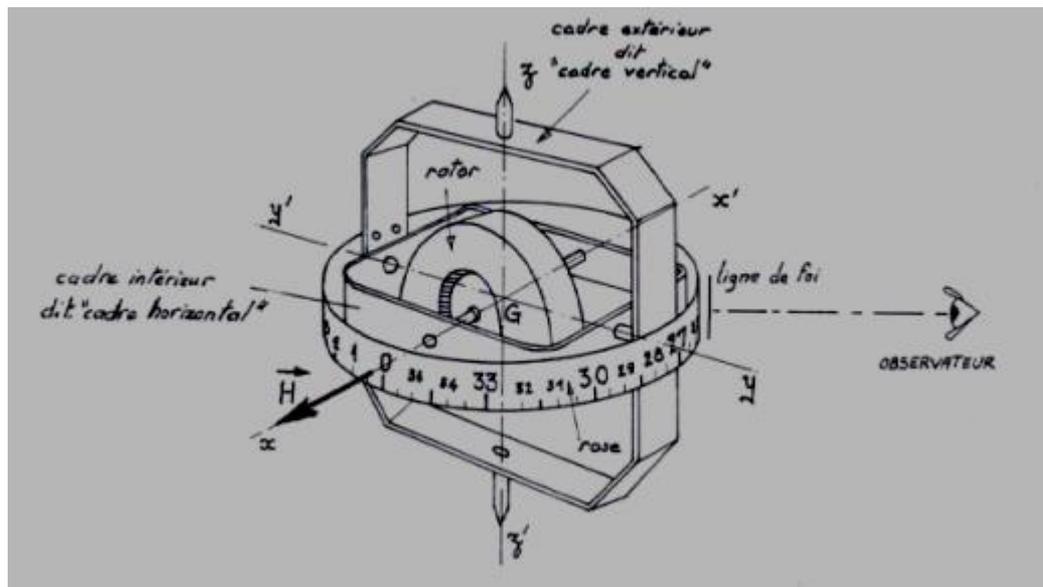
- Au sol :
 - Le pilote affiche à l'aide de la molette le cap lu sur le compas magnétique.
 - Il est recalé lors de l'alignement sur la piste avec le QFU précis.
- En vol :
 - En palier stabilisé recalage régulier avec la boussole (toutes 15 min) .





Fonctionnement

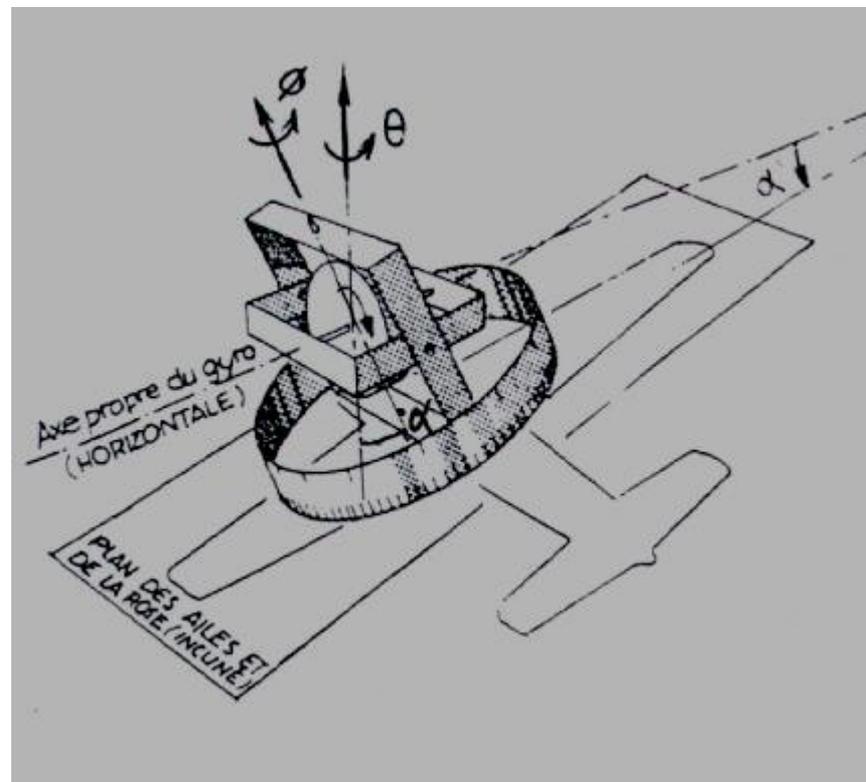
- Le cadre intérieur supporte le rotor du gyro
- Le cadre extérieur peut librement pivoter à l'intérieur d'un boîtier solidaire de l'avion





Erreur de virage

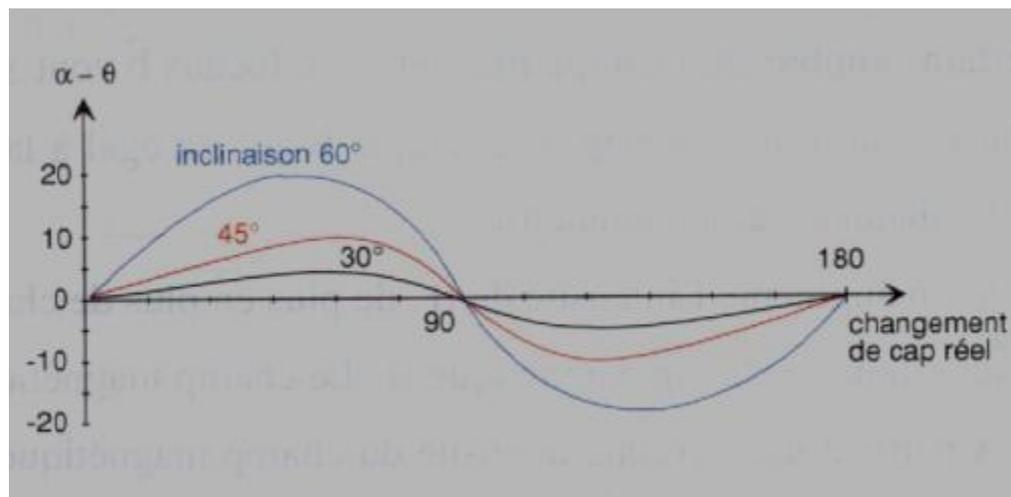
- Cette erreur provient du mode de suspension.
 - La rose des caps est solidaire de l'avion, le gyroscope reste asservi au plan horizontal local.
- Lorsque l'avion est en virage, la rose s'incline avec l'avion et les caps défilent dans un plan parallèle au plan des ailes.





Erreur de virage

- Le décalage $\phi - \theta$ est nul pour 90° , 180° , 270° , 360° de virage.
- Plus l'avion est incliné, plus l'erreur est importante.
- Quand l'avion sort de virage, l'indication de changement de cap est à nouveau exacte.
- Pour les avions légers, l'erreur en virage reste compatible avec les exigences du pilotage : $\phi - \theta < 4^\circ$ si $\alpha < 30^\circ$





Fly safe

Des questions ?