



3. Etude des aéronefs et des engins spatiaux

3.5 L'instrumentation de bord Versions Août 2025



3.4 L'instrumentation de bord

Son rôle

- **Pour régler et contrôler le bon fonctionnement du groupe motopropulseur**
- **Pour contrôler l'attitude, l'altitude et la vitesse de l'avion**
- **Pour naviguer**

Contrôle du fonctionnement du groupe motopropulseur

L'essence

Il faut le bon carburant

100II, 95, 98, 91UL, Jet A1

Comment sait on que c'est la bonne essence ?

On vérifie la couleur

On vérifie la **qualité**

Comment sait on que c'est la bonne qualité?

On vérifie qu'il ni a pas d'eau ni de sable....

Comment faire pour s'assurer que l'on a **assez d'essence dans le réservoir** ?

Mesurer le niveau d'essence dans les réservoirs

Calculer et/ou mesurer la consommation d'essence pour voir si on en a assez pour le vol.

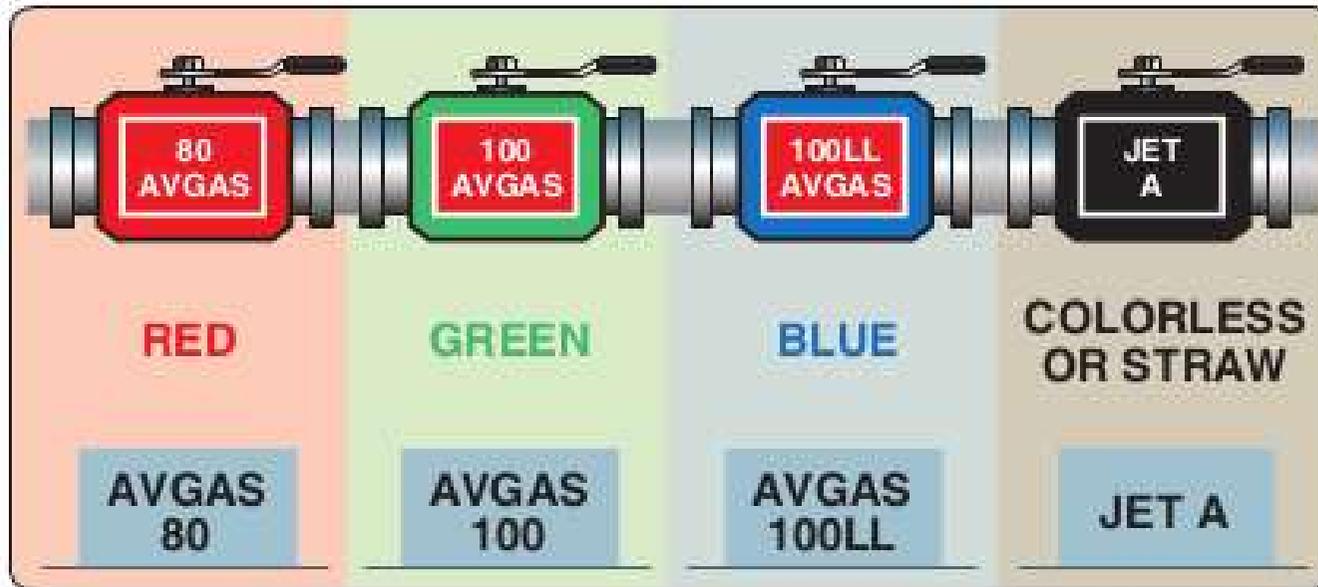
Présence d'une alarme de bas niveau



Contrôle du fonctionnement du groupe motopropulseur

L'essence

Couleur du carburant



Le SAF remplaçant du Jet A n'a pas de couleur.

in [www.faa.gov/./handbooks_manuals/pilotes handbook of aeronautical knowledge](http://www.faa.gov/./handbooks_manuals/pilotes%20handbook%20of%20aeronautical%20knowledge)

Contrôle du fonctionnement du groupe motopropulseur

La jauge à essence

Les jauges à lecture directe :

- Les jauges à lecture directe comportent un flotteur solidaire d'un index.
- L'index est visible de l'extérieur
- Utilisable que sur les avions légers où le réservoir se trouve à proximité du poste de pilotage.



Les jauges à lecture indirecte :

Les jauges à lecture indirecte sont utilisées lorsque les réservoirs se trouvent loin du moteur et du pilote.

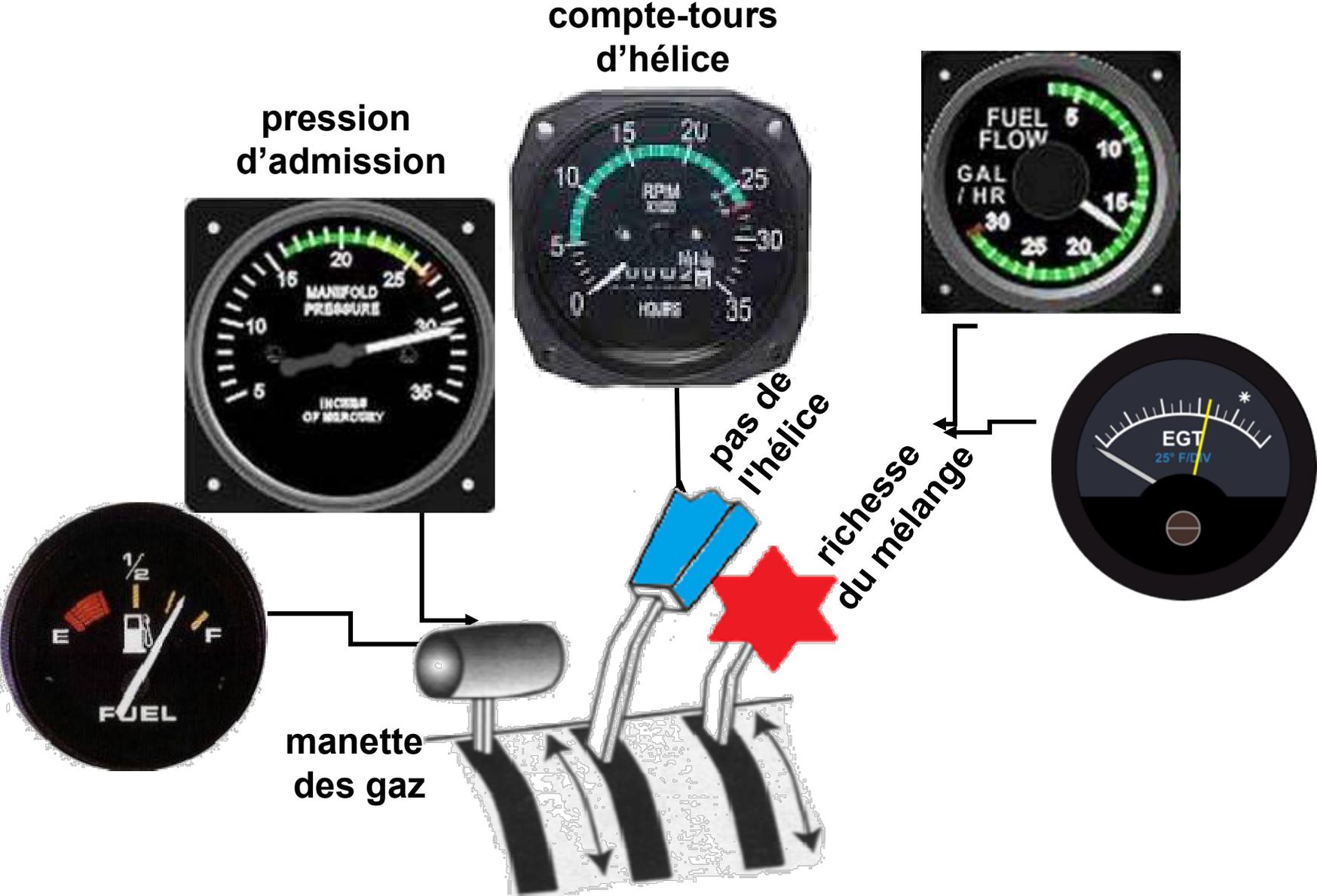
- les jaugeurs à flotteur
- les jaugeurs électriques à capacité



Les jaugeurs électriques sont à utiliser avec circonspection : ils sont rarement précis, il peuvent tomber en panne !

Quand c'est possible, une bonne sécurité : regarder directement dans le réservoir le niveau approximatif de l'essence

Surveillance et réglage du moteur



La température du moteur

Le moteur à explosion d'un avion peut être refroidi **par air ou par eau**. Par ex :

- air : Lycoming, Continental
- eau et Air: Rotax

Si le moteur est refroidi par eau :
il y a un radiateur d'eau

On vérifie la température de l'eau ou du liquide de refroidissement



Moteur refroidi par eau ou par air:

- On mesure la température de la tête de cylindre (CHT)
- Pour contrôler la richesse du mélange : on mesure la température des gaz d'échappement (EGT).



L'huile

Il faut la bonne huile en fonction de la température
Comment sait on que c'est la bonne huile?
On vérifie sur le carnet d'entretien ou le bidon

On vérifie la qualité
Comment sait on que c'est la bonne qualité?
On vérifie la couleur de l'huile.

- **jaune = OK**
- **noir ou brun = huile à changer**

Comment faire pour s'assurer que l'on a de l'huile dans le moteur?

- **Mesure du niveau d'huile dans le carter moteur (ni trop peu, ni trop)**
- **Alarme de niveau bas.**
- **Alarme de pression basse**



Entraînement de l'hélice et poussée du réacteur

Pour vérifier que **l'hélice** tourne au bon régime on utilise le **compte-tour**.



Pour vérifier la bonne **poussée du réacteur** on mesure:

- La vitesse de rotation N1 (compresseur turbine BP)
- L' E.P.R. (engine pressure ratio)

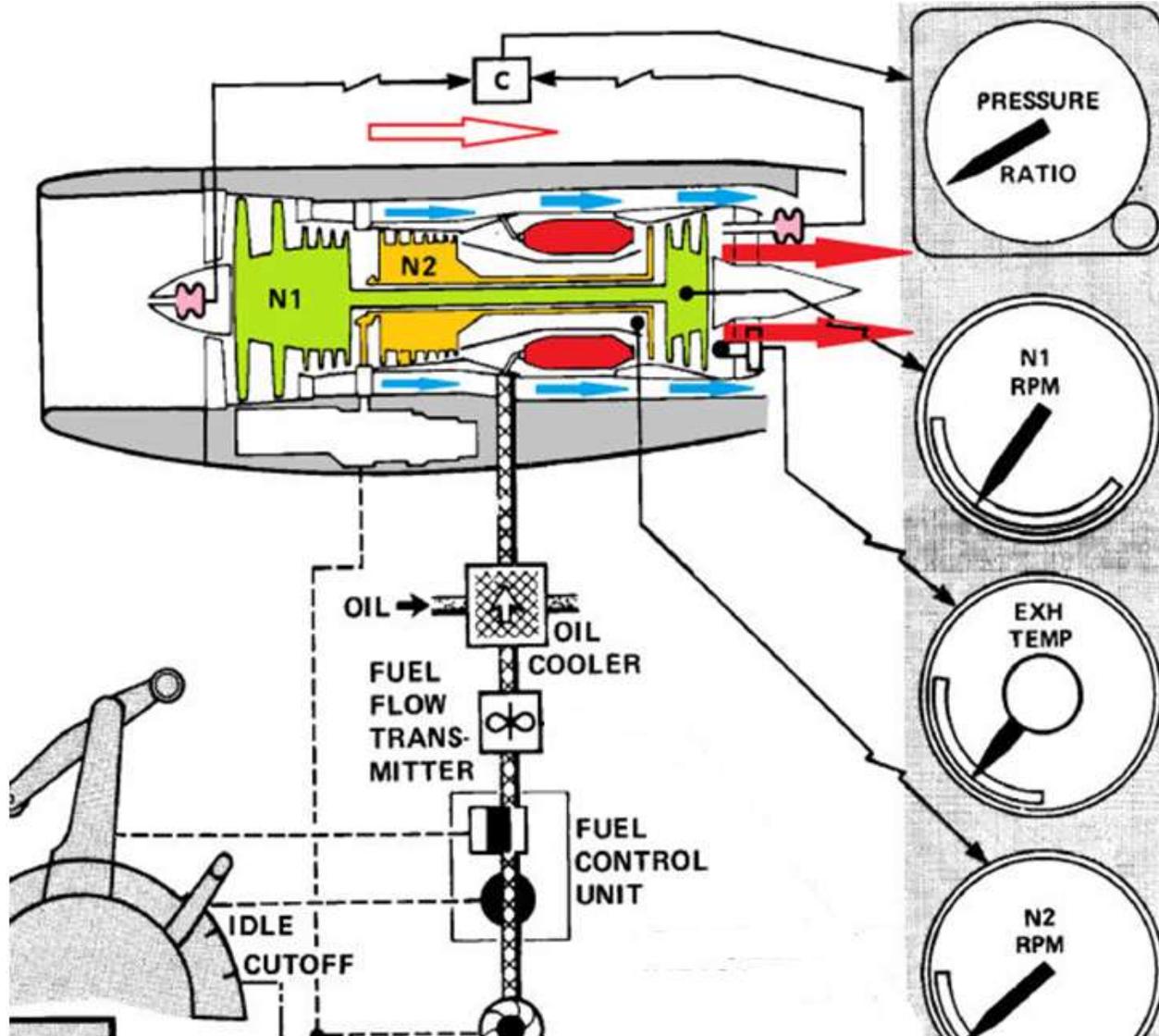
Avantages :

- l'EPR est proportionnel à la poussée
- l'affichage représente la puissance disponible des gaz.

Fluctue lors de turbulence



Surveillance du réacteur



Pour faire voler l'avion et aller là où il veut aller, le pilote a besoin de plusieurs outils et instruments de vol

Si le pilote voit le sol (VFR) il peut utiliser:

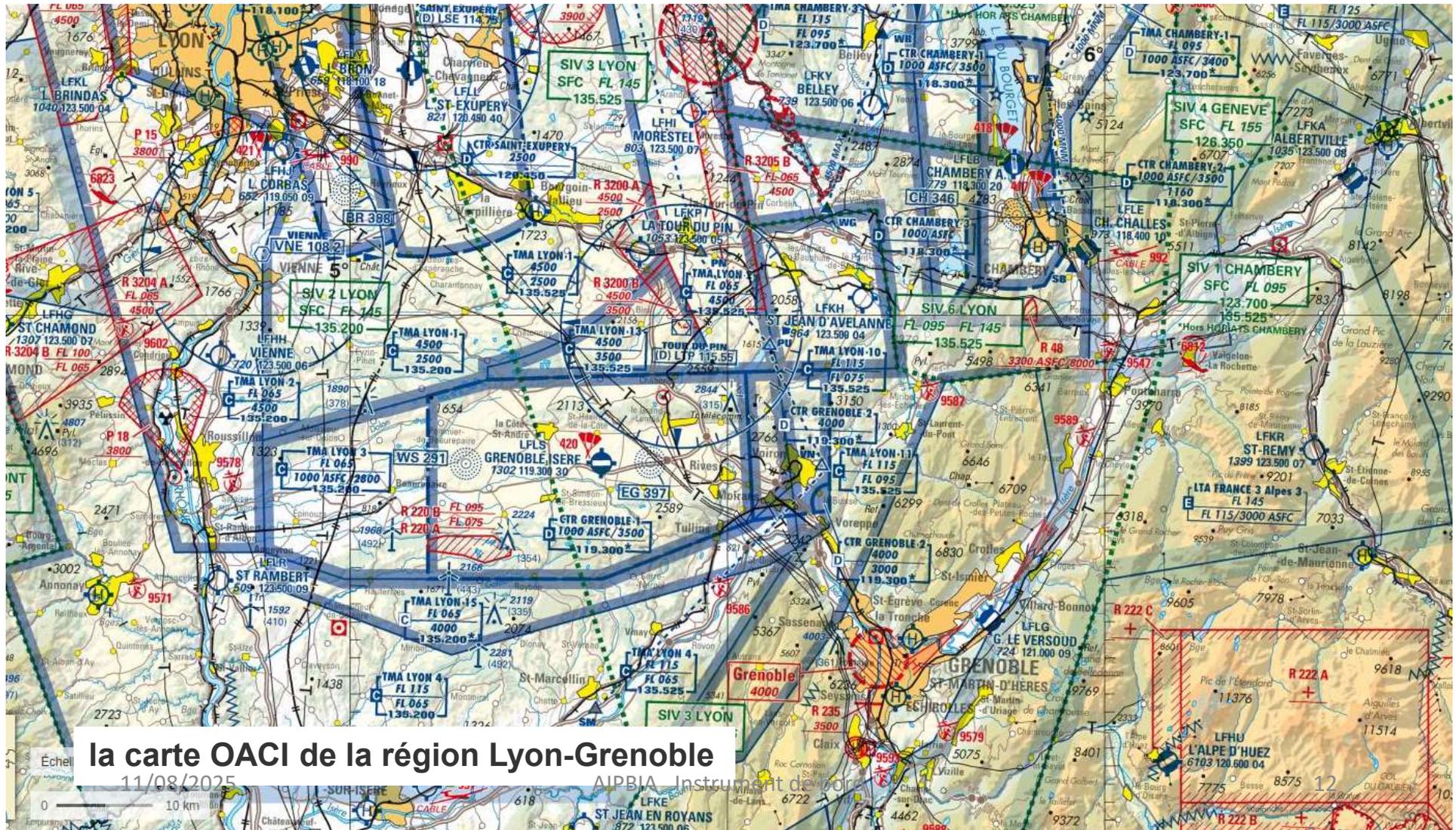
- ses yeux !
- une carte
- une boussole (compas)
- une montre
- un altimètre
- un variomètre
- un anémomètre



Quand le pilote ne voit pas le sol (IFR), il doit utiliser des instruments supplémentaires.

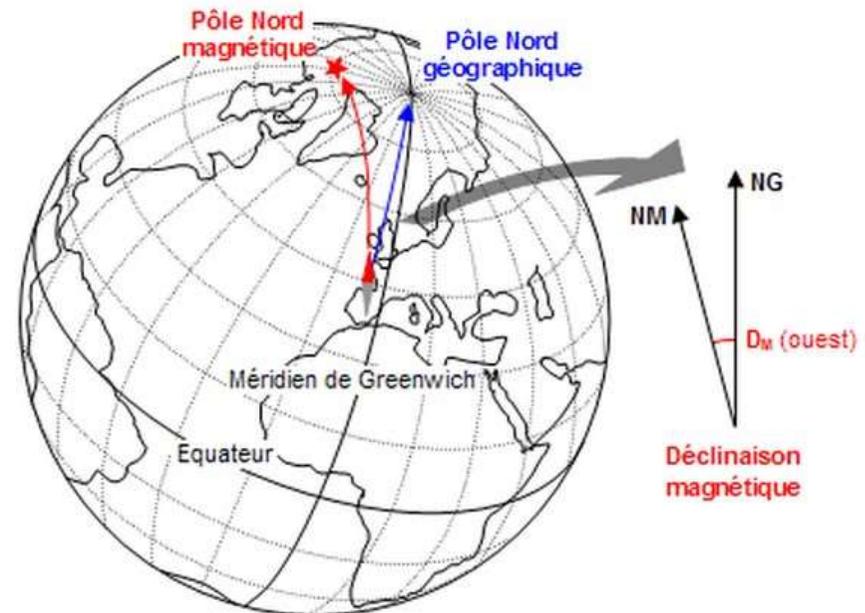
La carte aéronautique

Une carte qui regroupe l'information aéronautique dont le pilote a besoin le long de son trajet. Sa lecture demande un certain apprentissage : **cf partie "Navigation"**



La boussole (le compas magnétique)

- Le compas magnétique est une boussole.
- Il indique le nord magnétique.
- Les cartes faisant référence au nord géographique (nord vrai) il faut tenir compte de la déclinaison (angle entre le nord vrai et le nord magnétique).
- La déclinaison varie régulièrement d'une année sur l'autre
En novembre 2020, la déclinaison magnétique à Grenoble est de 2°4'E. Elle augmente d'env. 8'/an



Le compas

C'est l'instrument qui nous **donne le cap magnétique**

Le compas magnétique est très sensible à l'environnement radioélectrique du cockpit.

Un tableau sous le compas donne les corrections à appliquer:

La Déviation

Le compas traditionnel à flotteur

L'instrument se présente comme une boussole boule ou plate qui baigne dans un liquide amortisseur.

Il est perturbé lors des accélérations, quand l'avion est en virage, en montée ou en descente. Il s'utilise donc **en vol en palier rectiligne**. Il sert surtout à recalibrer le conservateur de cap.



La compas à cadran vertical

Cet instrument n'est utilisé que dans certaines avioniques récentes. Il ressemble visuellement à un conservateur de cap.

Le plateau aimanté n'est pas freinée par du liquide (pas de risque de fuites), mais par courants de Foucault. Son mouvement est transmis au cadran de lecture par un jeu d'engrenages.



Les instruments barométriques

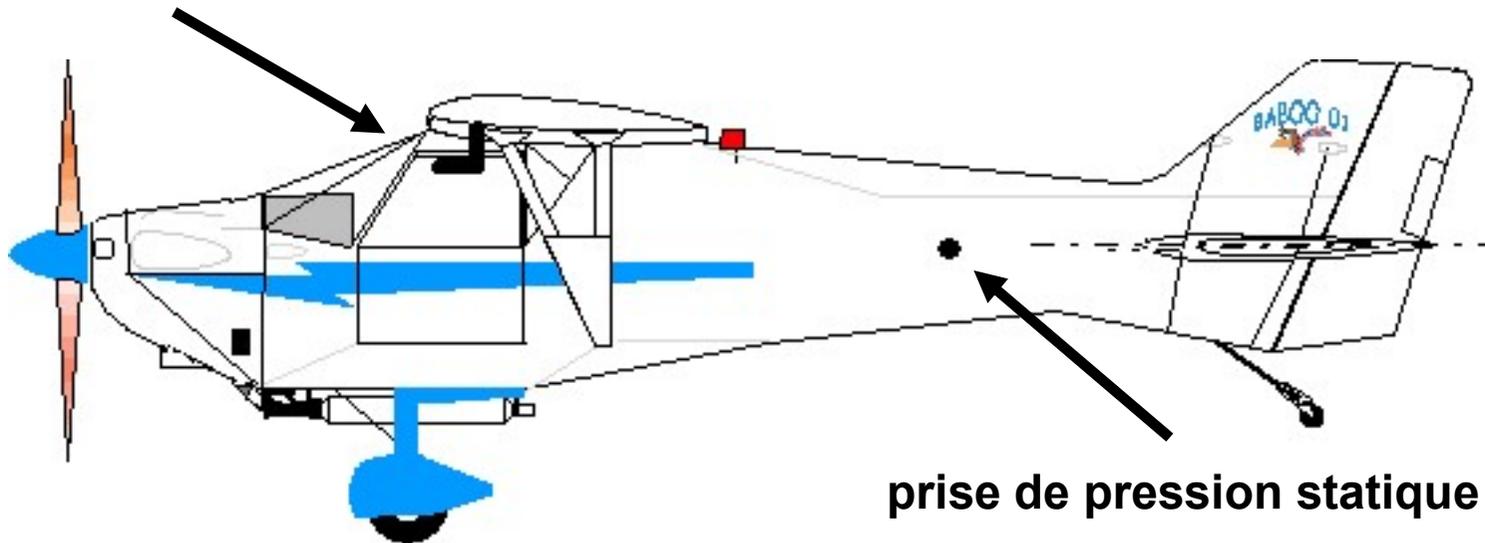
L'altimètre



Le variomètre



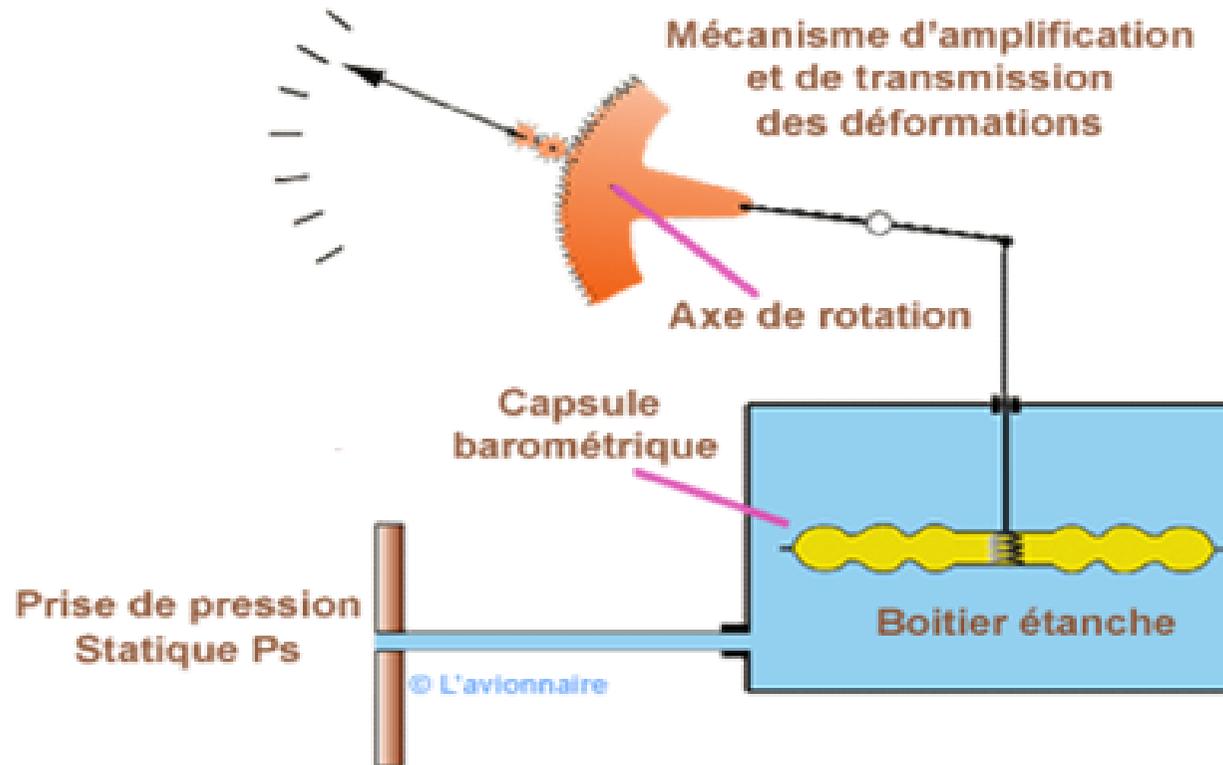
prise de pression dynamique



La pression

- La pression est une force par unité de surface. Elle est exprimée en pascal : **1 Pa = 1 newton / m²**
- On peut obtenir une augmentation de pression par:
 - une action mécanique. Exemple : pompe à vélo..
 - une action dynamique. Exemple : mise en mouvement d'un avion.
- On va utiliser trois dénominations:
 - **la pression statique**: celle de l'air immobile Ps.
 - **la pression dynamique**: celle de l'air en mouvement
 - $Pd = 1/2 \times \rho \times V^2$ ρ (rho) est la masse volumique de l'air (1,225 kg/m³)
 - **la pression totale $Pt = Ps + Pd$**
 -
- L'avion étant en mouvement
 - l'air dans lequel il se déplace est à une pression statique Ps
 - l'air qui le frappe est à la pression totale Pt
 - la pression dynamique est la différence des deux : **$Pd = Pt - Ps$**

L'altimètre : principe de fonctionnement



L'altimètre est un baromètre (mesure de pression statique) gradué en pieds. Il est étalonné sur l'atmosphère standard:

- $T = 15^{\circ}\text{C}$ et $P = 1013,25 \text{ hPa}$ au niveau de la mer
- Diminution de la pression avec l'altitude selon une loi bien définie

L'altimètre : calibration

Suivant son calage, il sert à mesurer:

- **la hauteur**
- **l'altitude**
- **niveau de vol** d'un avion.

Dans ces 3 cas on utilise la mesure de la **pression d'air statique**, mais avec des calages différents du 0 de l'altimètre

En dessous de 2000m (~ 6500 ft) d'altitude, la pression statique diminue d'environ **1 hPa tous les 28 pieds (8,5m)** .

L'altimètre : calibration



**molette et fenêtre de réglage
de la pression (hPa) à $z = 0$**

L'altimètre : calages altimétriques

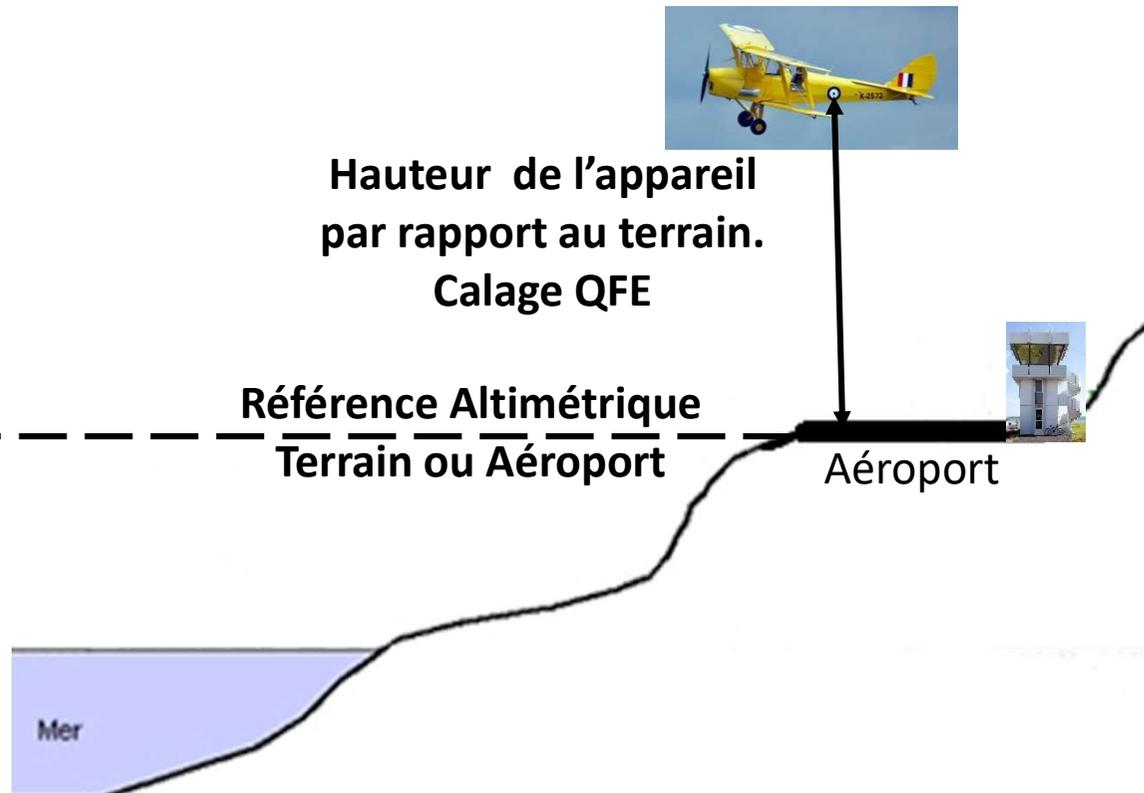
Hauteur au dessus du sol

Était utilisé pour les vols locaux.

L'altimètre est **calé à 0 ft au seuil de piste.**

La pression affichée s'appelle le **QFE.**

En vol, l'altimètre indiquera la **hauteur** de l'avion au dessus de la piste.



L'altimètre : calages altimétriques

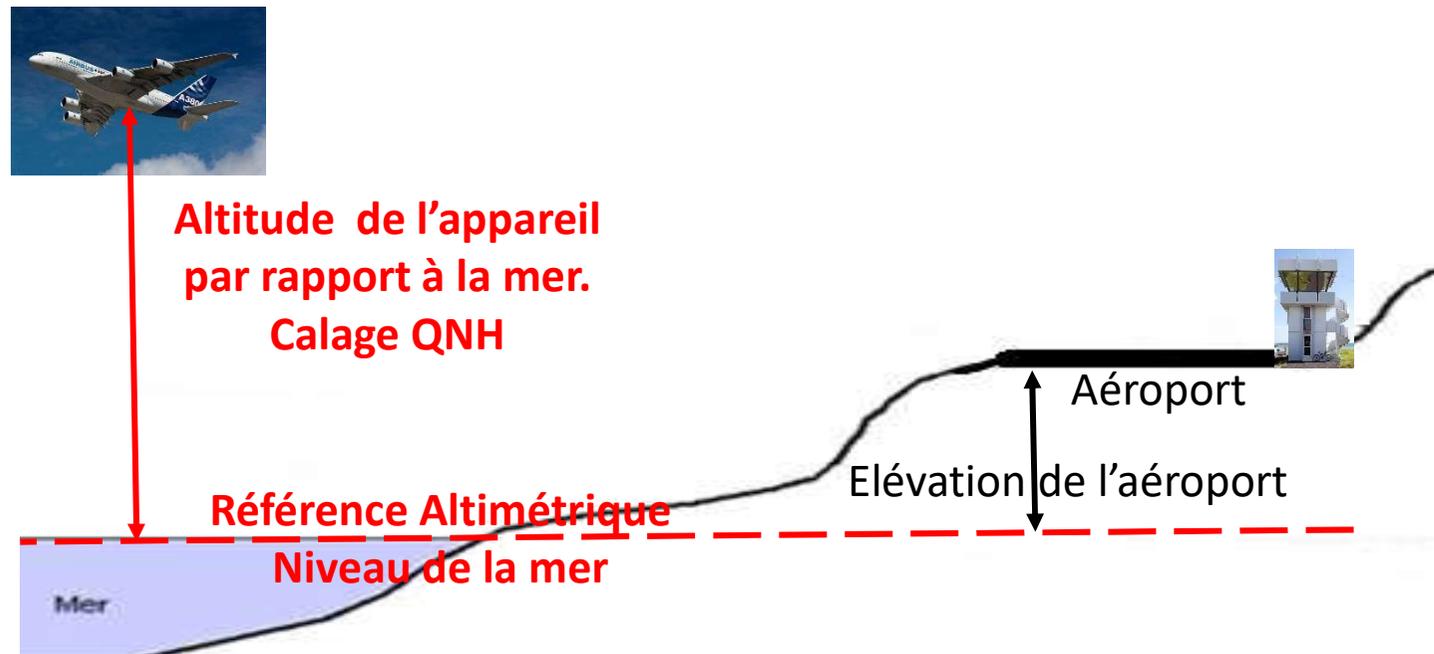
Altitude (hauteur au dessus du niveau de la mer)

Utilisé pour les navigations à basse altitude

L'altimètre est calé à 0 ft au niveau de la mer

La pression affichée s'appelle le **QNH**.

Elle est donnée par le contrôle, ou se retrouve en calant l'altimètre à l'altitude de la piste



L'altimètre : calages altimétriques

Niveau de vol

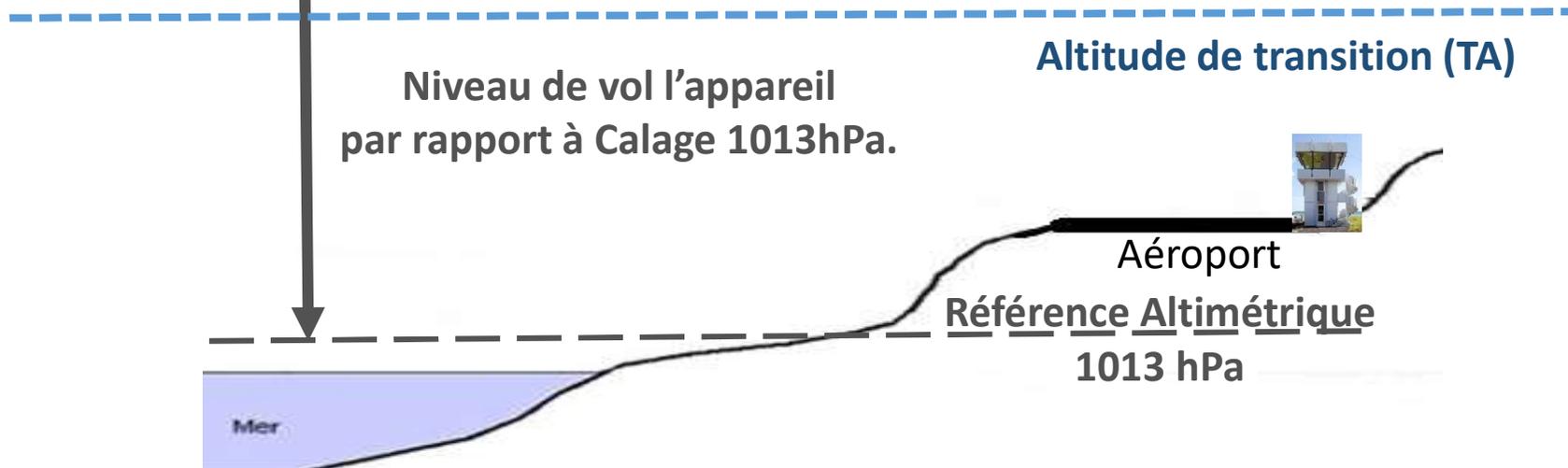
Utilisé pour les navigations en altitude, au dessus du "niveau de transition"

L'altimètre est calé à **1113,25 hPa au niveau de la mer (atmosphère standard)**

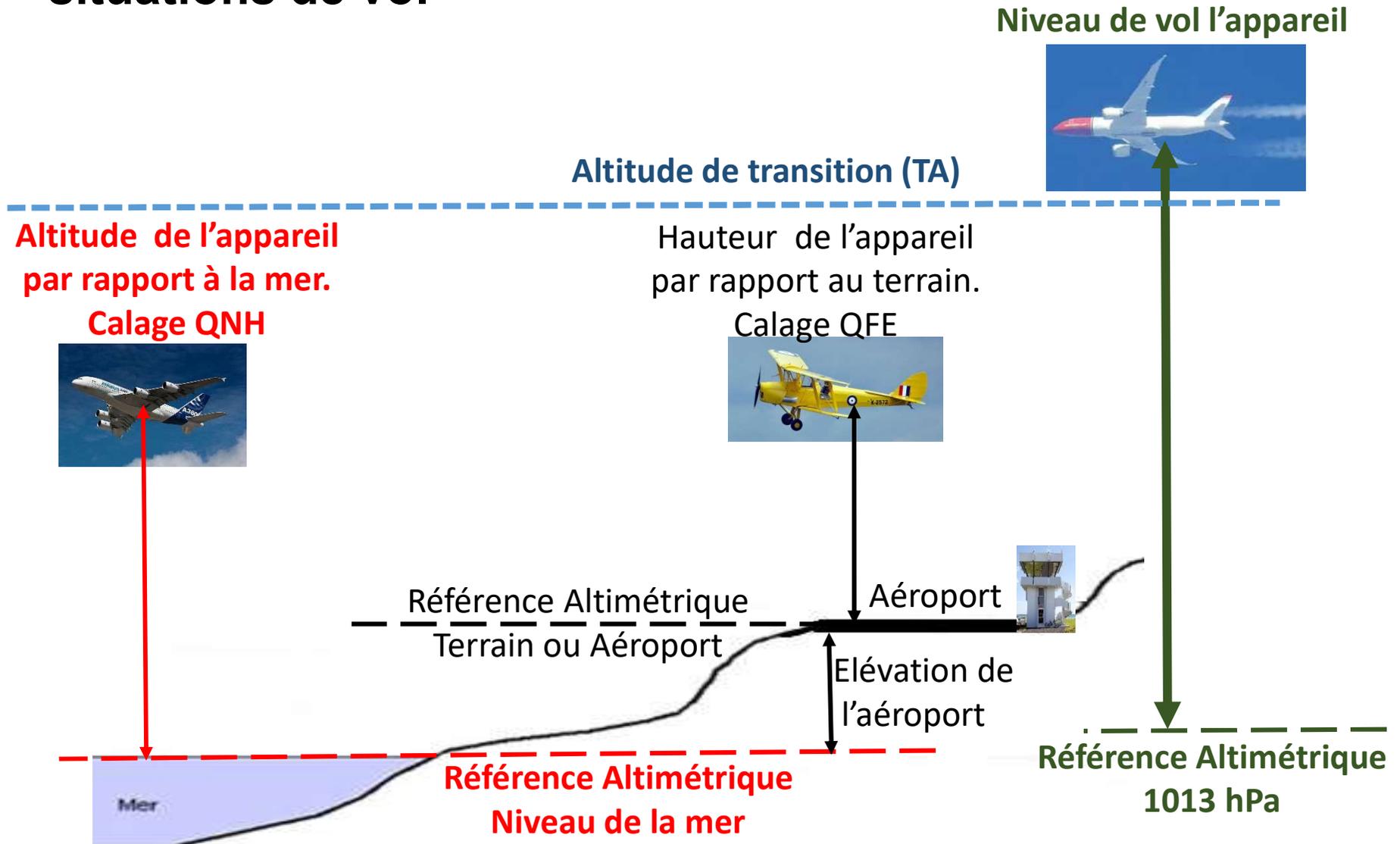
Pression affichée dans la fenêtre de l'altimètre : 1013,25 hPa



Les niveaux sont exprimés en centaines de ft. Par exemple : FL150 = 15 000 ft



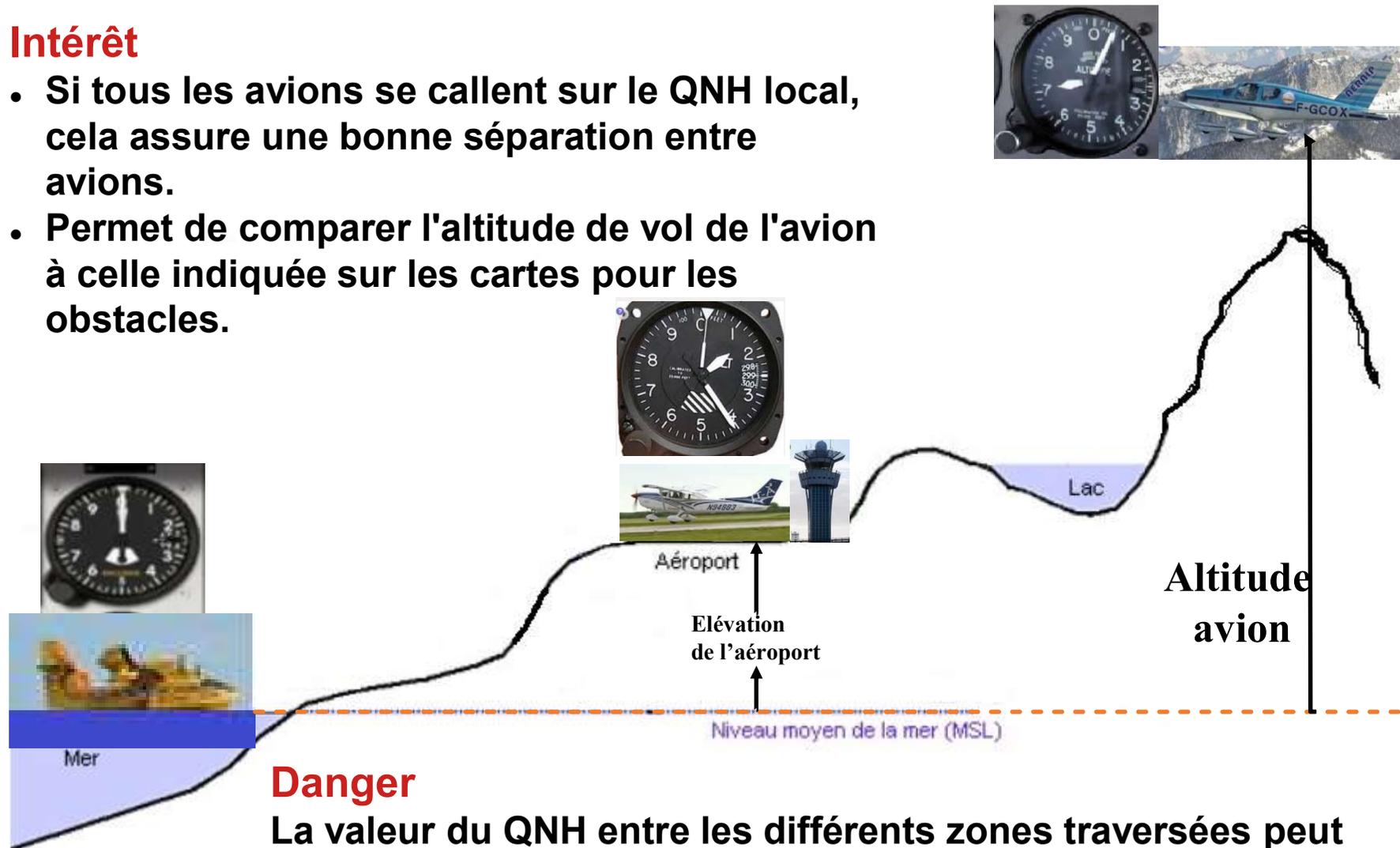
En résumé : calages altimétriques dans différentes situations de vol



Sécurité altimétrique : QNH

Intérêt

- Si tous les avions se callent sur le QNH local, cela assure une bonne séparation entre avions.
- Permet de comparer l'altitude de vol de l'avion à celle indiquée sur les cartes pour les obstacles.



Danger

La valeur du QNH entre les différents zones traversées peut différer → il ne faut pas oublier de changer le calage altimétrique au cours du vol.

Sécurité altimétrique : règles de calage

> 3000 ft ou > **altitude de transition**



calage au 1013 hPa (FL)

< 3000 ft ou < **altitude de transition**

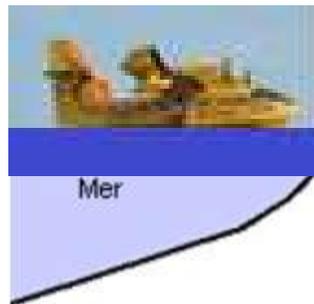


calage au QNH



Aéroport

Lac



Mer

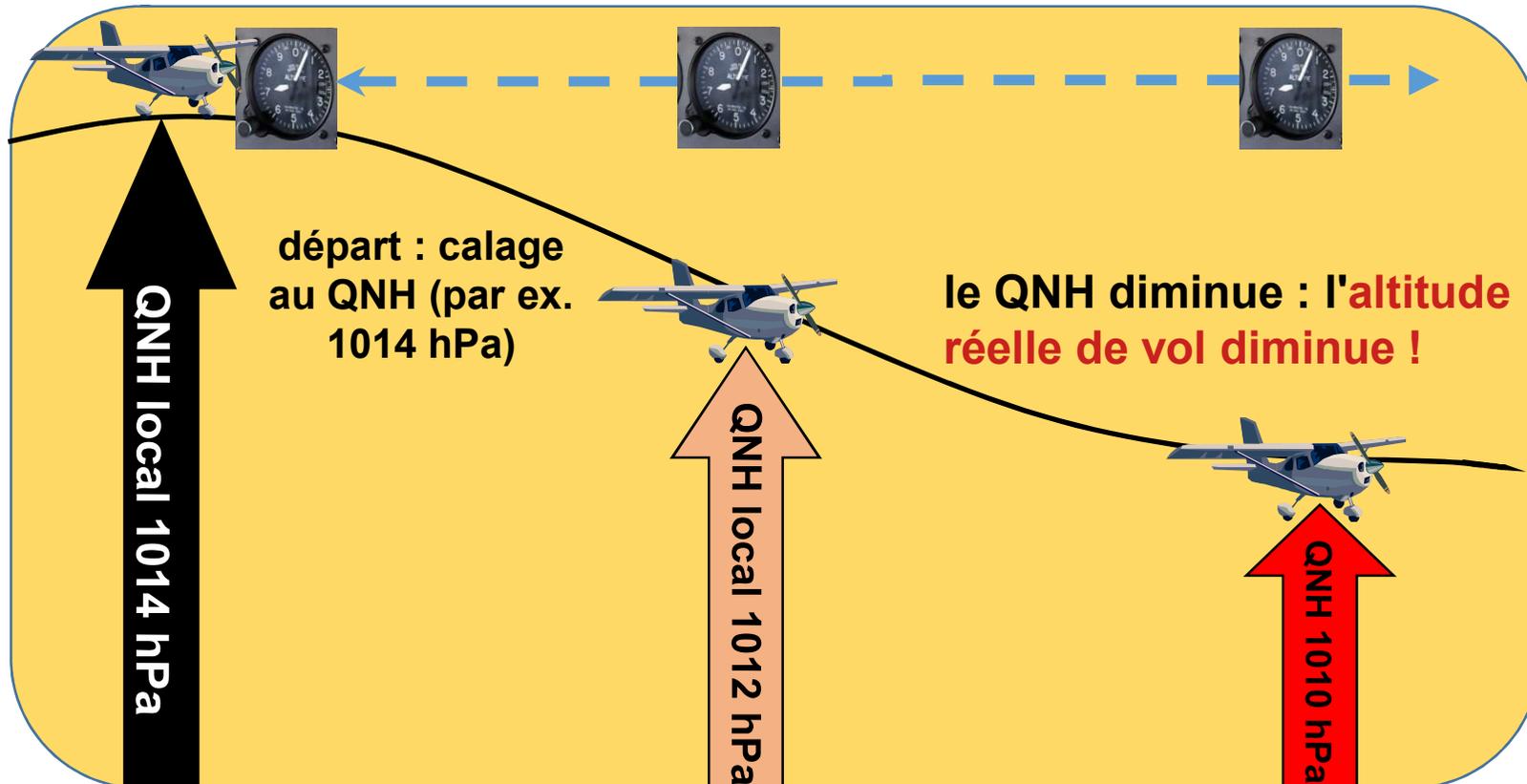
Niveau moyen de la mer (MSL)

1000 ft ASFC

Avantage de la règle de calage altimétrique

l'harmonisation des calages de part et d'autre de l'altitude de transition permet une séparation sûre des aéronefs

L'altimètre et les variations de pression météorologiques



"Quand je vole d'une haute pression vers une basse pression sans ajuster mon calage altimétrique mon altitude vraie est inférieure à celle indiquée..."

Le variomètre

Le variomètre mesure la **variation d'altitude**

Les valeurs positives indiquent une montée,
les négatives une descente

Le taux de montée ou de descente est
exprimé en ft/mn ou m/s

$$1000 \text{ ft/mn} \approx 5 \text{ m/s}$$

Cet instrument sert pour tous
les types d'aéronefs : avions,
planeurs, deltaplanes,
parapentes...

variomètre utilisé en parapente :
affichage à la fois numérique et
analogique, couplé à alerte sonore

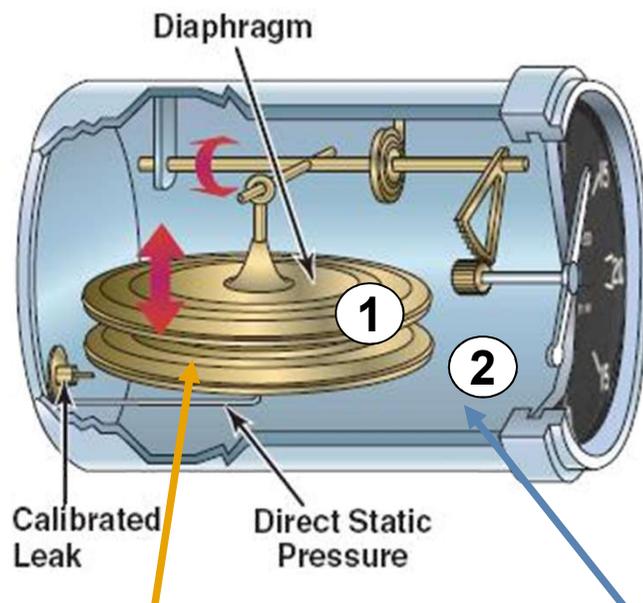


variomètre d'avion. Sur
les EFIS, affichage digital

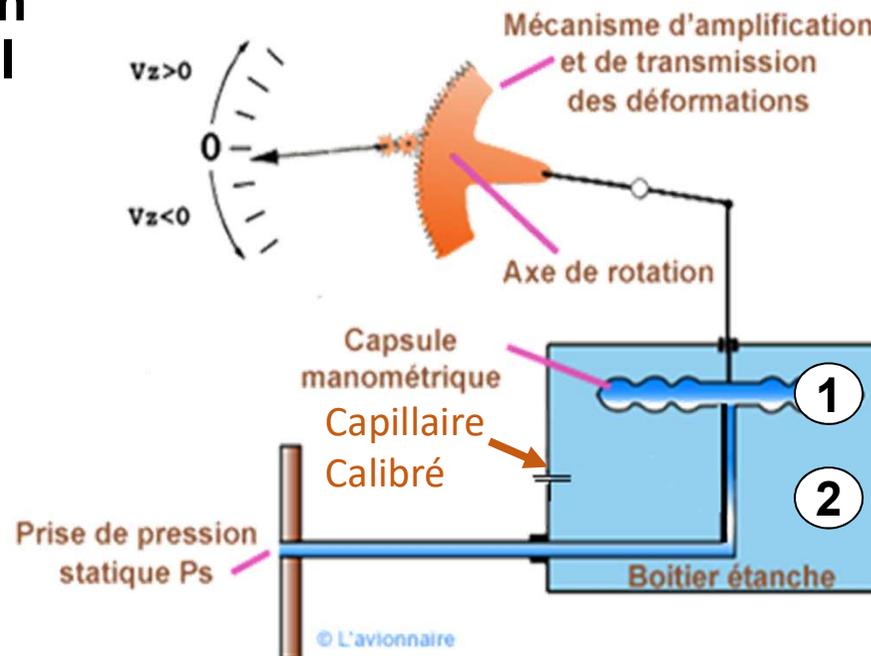


Le variomètre : principe de fonctionnement

Comme l'altimètre, il utilise la pression statique. C'est un baromètre différentiel



(1) capsule à mise en pression instantanée



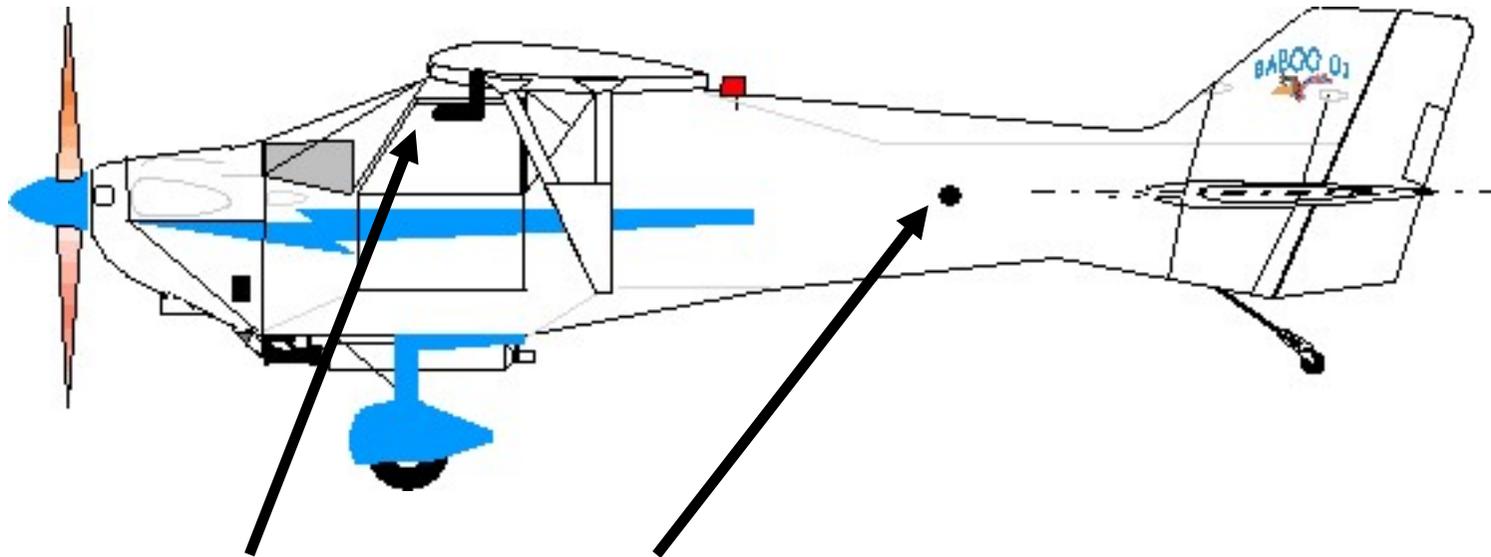
(2) réservoir mis en pression par l'intermédiaire d'un capillaire calibré : mise en pression lente, pression "en retard" d'un temps t sur la pression vraie

L'appareil mesure la **différence de pression entre le réservoir et la capsule**
Cette différence de pression pendant t est convertie en $\Delta z/t$

- Le temps de réponse peut être de 1 à 5s.
- **La vitesse verticale (V_z) est surestimée** en altitude (30% à 11 000m).
- Les variations de température du boîtier engendrent une erreur de l'indication.

Les instruments barométriques : l'anémomètre

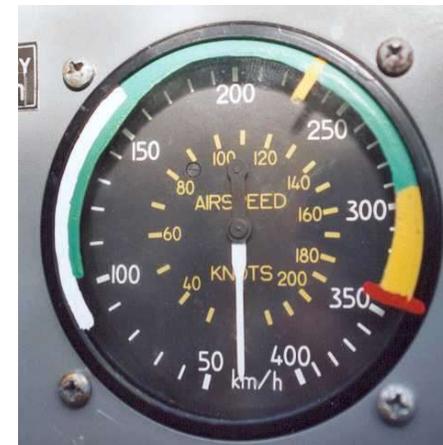
C'est l'indicateur de vitesse



pression totale – pression statique = **pression dynamique**

L'anémomètre est un instrument qui mesure la pression dynamique et la convertit en vitesse par rapport à l'air en utilisant le théorème de Bernouilli.

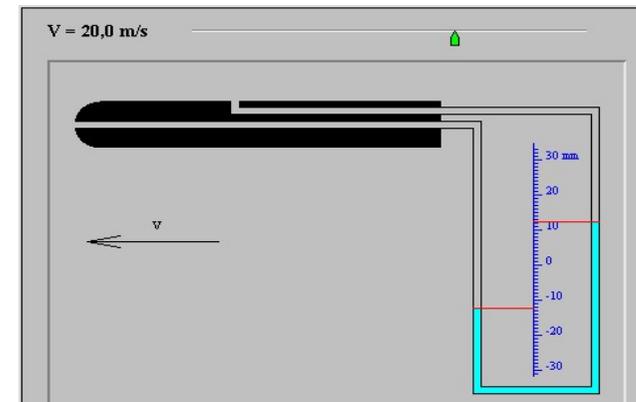
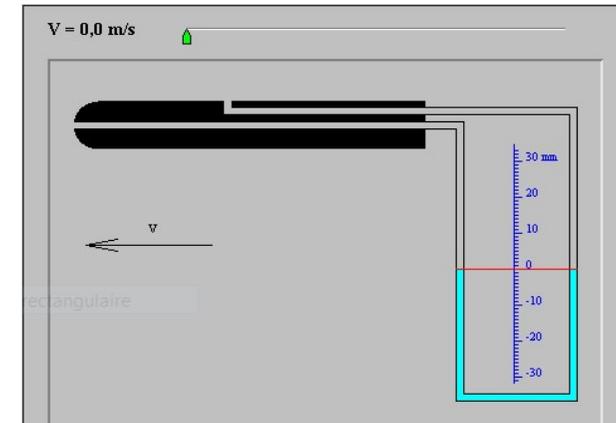
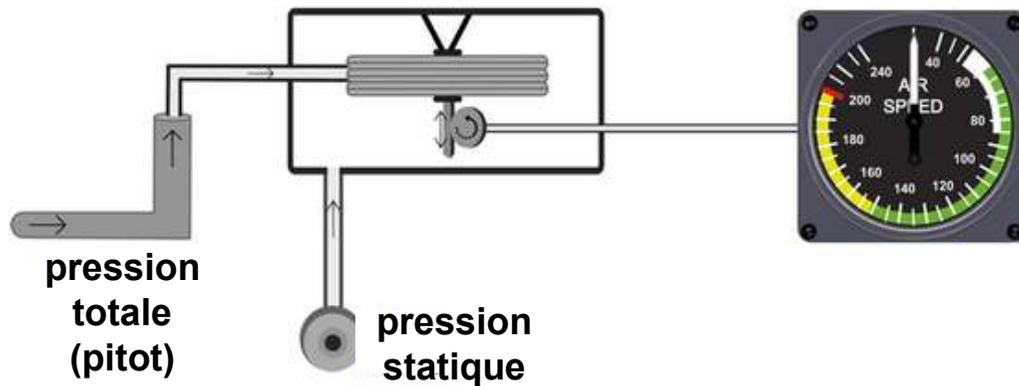
Plus la vitesse dans l'air augmente, plus la pression dynamique augmente



L'anémomètre : principe de fonctionnement

L'instrument déduit la pression dynamique de la mesure de la pression statique et de la pression totale.

La pression dynamique est convertie en vitesse



De la pression dynamique à la vitesse :
application du théorème de Bernouilli

$$V^2/2 + g \cdot z + p/\rho = cte$$

V : vitesse
g : pesanteur
z : altitude

p : pression dynamique
 ρ : (rho) : masse volumique
cte : constante qui dépend de la géométrie de l'écoulement

L'anémomètre

On parle aussi de "**badin**"⁽¹⁾, associé au "**(tube de) pitot**"⁽²⁾

Le tube de Pitot (ou pitot) regroupe les prises d'air statiques et dynamiques. **Ces prises peuvent aussi être séparées**



Attention :

- le badin donne une **vitesse air (IAS)**
- sur cet EFIS, la **vitesse, mesurée par GPS, est la vitesse sol (GS)**



- Les badins modernes peuvent être à affichage digital
- Les machmètres ont une présentation analogue mais les graduations sont en nombre de Mach

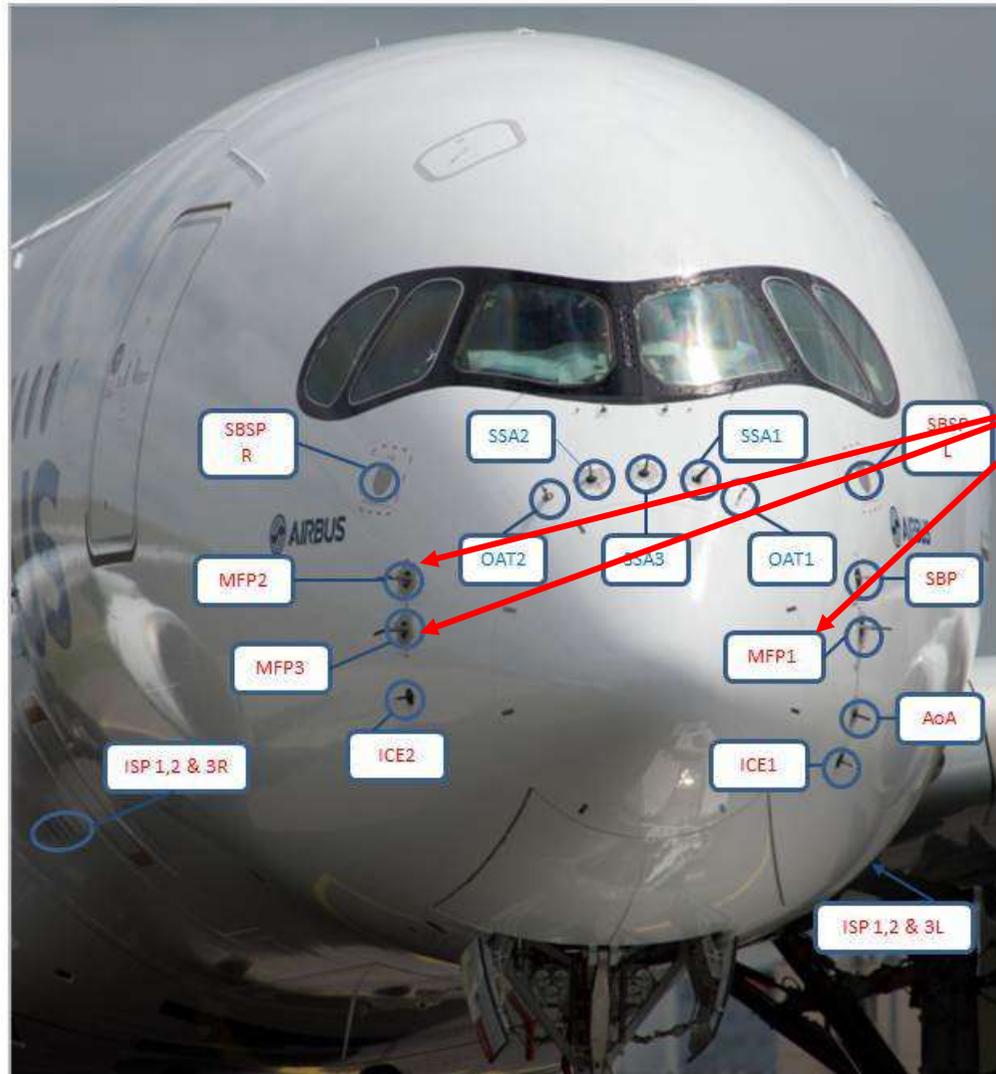


(1) badin : du nom de son inventeur, Raoul Badin (1911)

(2) pitot : du nom de son inventeur, Henri Pitot (1732). D'abord utilisé pour mesurer la vitesse d'un bateau

L'anémomètre

Un nez d'Airbus : les multiples sondes, dont **3 tubes pitot (MFP 1 à 3)**



ISP = Integrated Static Port

SBSP = StandBy Static Port (ISIS)

MFP = Multi Functional Probe (Pitot, AoA & TAT)

AoA = Angle of Attack (Adiru#1 and PFCS)

SBP = StandBy Pitot (ISIS)

SSA = Side Slip Angle

OAT = Outside Air Temp.

ICE = Ice Detector

L'anémomètre

Sur l'anémomètre sont repérés des **arcs de couleurs conventionnelles pour séparer les vitesses autorisées pour l'avion**

Arc vert : zone d'utilisation normale

- **VS1** : vitesse de décrochage en lisse
- **VNO** : vitesse à ne pas dépasser en atmosphère agitée

Arc jaune : zone interdite en atmosphère turbulente, limitée par VNO et VNE

- **VNE** : vitesse à ne jamais dépasser (**trait rouge**)

Arc blanc : zone d'utilisation normale en configuration d'atterrissage (volets et train sortis)

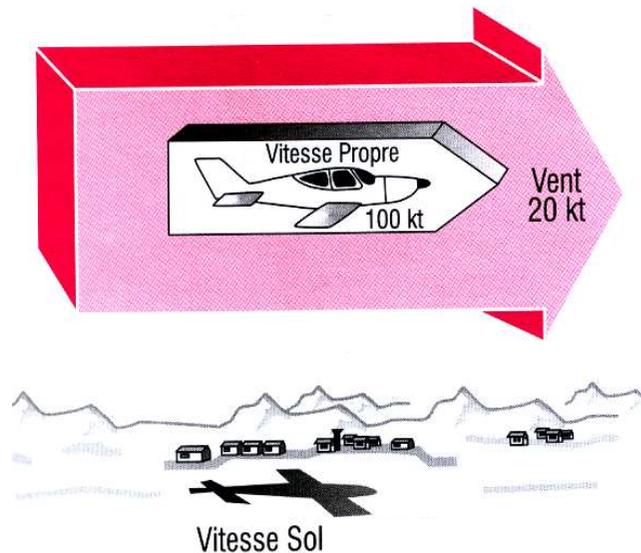
- **VFE** : vitesse max d'utilisation des volets sortis
- **VLE** : vitesse max d'utilisation du train sorti
- **VSO** : vitesse de décrochage volets et train sortis.



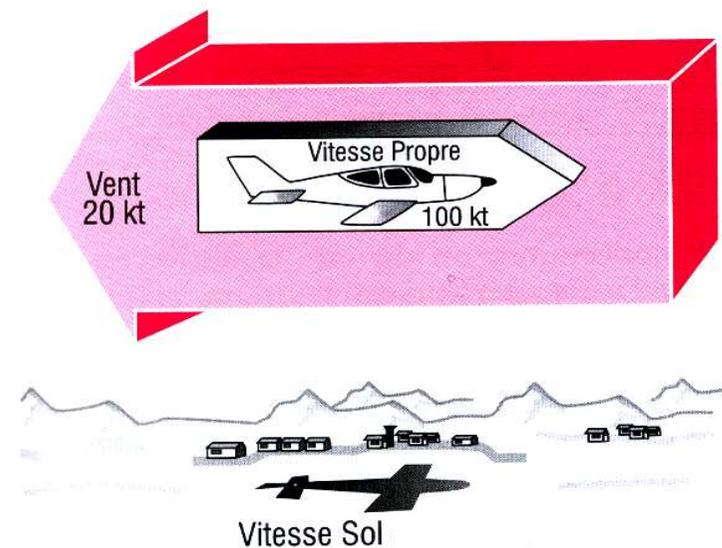
L'anémomètre

- Pour la navigation il faut prendre en compte 2 vitesses:
 - La **vitesse propre (Vp)** = composante horizontale de la **vitesse vraie** (= vitesse de l'avion dans l'air). Proche de la **vitesse indiquée mesurée par l'anémomètre, moyennant une correction d'altitude**.
 - La **vitesse sol (Vs)** = vitesse horizontale de l'appareil par rapport au sol.

La différence entre ces deux vitesses est liée à la **vitesse du vent**.



$$\text{vitesse sol} = 100 + 20 = 120 \text{ kt}$$



$$\text{vitesse sol} = 100 - 20 = 80 \text{ kt}$$

Le machmètre

- **Pour les avions rapides volant en haute altitude les badins ne donnent pas d'indications fiables. Ils sont équipés d'un machmètre.**
- **$M = V_v/a$.**
 - **V_v la vitesse vraie**
 - **a = vitesse du son dans milieu ambiant**
- **Si $M < 1$ la vitesse est subsonique**
- **Si $M > 1$ la vitesse est supersonique**
- **Si $0,8 < M < 1$ la vitesse est transsonique**

Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

La "VFE" correspond à la :

- a) vitesse maximale avec volets sortis.
- b) vitesse minimale de sustentation.
- c) vitesse à ne jamais dépasser.
- d) vitesse à utiliser en phase finale d'atterrissage.

L'erreur instrumentale du compas magnétique d'un avion est :

- a) la déclinaison.
- b) la déviation.
- c) la dérive.
- d) l'inclinaison déviatrice.

La pression utilisée par l'altimètre est :

- a) la pression totale.
- b) la pression dynamique.
- c) la pression statique.
- d) la pression manométrique.

L'arc blanc d'un anémomètre correspond :

- | | |
|----|--------------------------------------|
| a) | au domaine de vitesses en lisse. |
| b) | au domaine d'utilisation des volets. |
| c) | à la vitesse de décrochage. |
| d) | aux vitesses à ne jamais dépasser. |

Un variomètre mesure :

- a) la vitesse propre.
- b) la variation de vitesse propre.
- c) l'altitude.
- d) la vitesse verticale.

La sonde Pitot est un dispositif permettant de mesurer :

- | | |
|----|----------------------------------|
| a) | la vitesse. |
| b) | la température. |
| c) | la pression statique uniquement. |
| d) | l'altitude. |

Les instruments gyroscopiques

Un gyroscope est une pièce lourde mise en rotation rapide autour d'un axe. Cet axe a la propriété de garder toujours la même orientation ⁽¹⁾, et peut donc fournir une référence d'orientation par rapport à la Terre, quelle que soit la position de l'avion.

Les instruments qui utilisent cette propriété du gyroscope sont :



l'horizon artificiel



le conservateur de cap



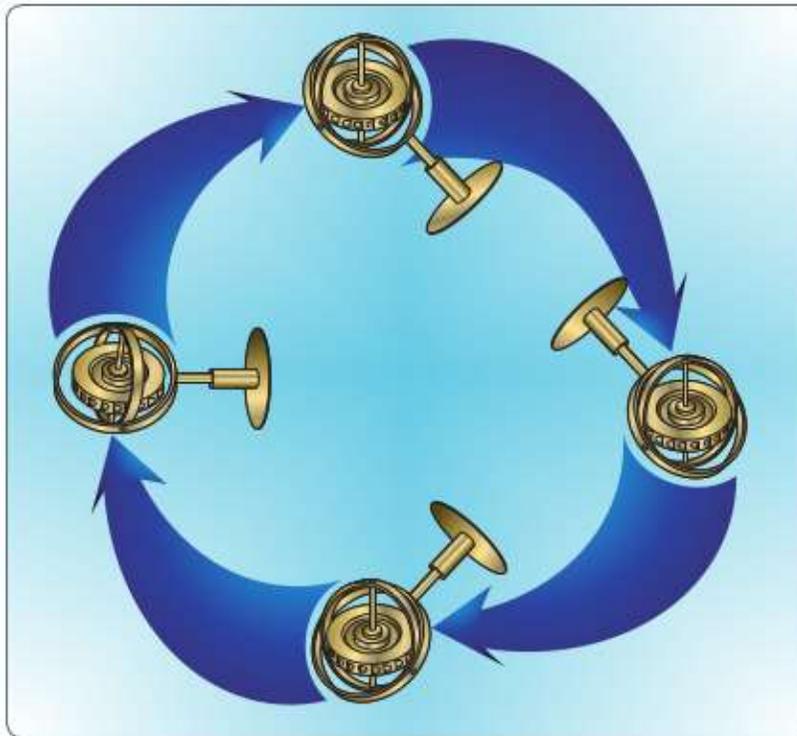
l'indicateur de virage

⁽¹⁾ Note : pas tout à fait vrai à cause du phénomène de précession, qui dévie le gyroscope en réaction aux forces qui s'exercent sur lui

Le gyroscope

Un gyroscope : un objet dense en rotation rapide autour d'un axe.

Quelque soit la position de son socle, **un gyroscope tend à garder la même position dans l'espace, son axe pointant dans une direction fixe**

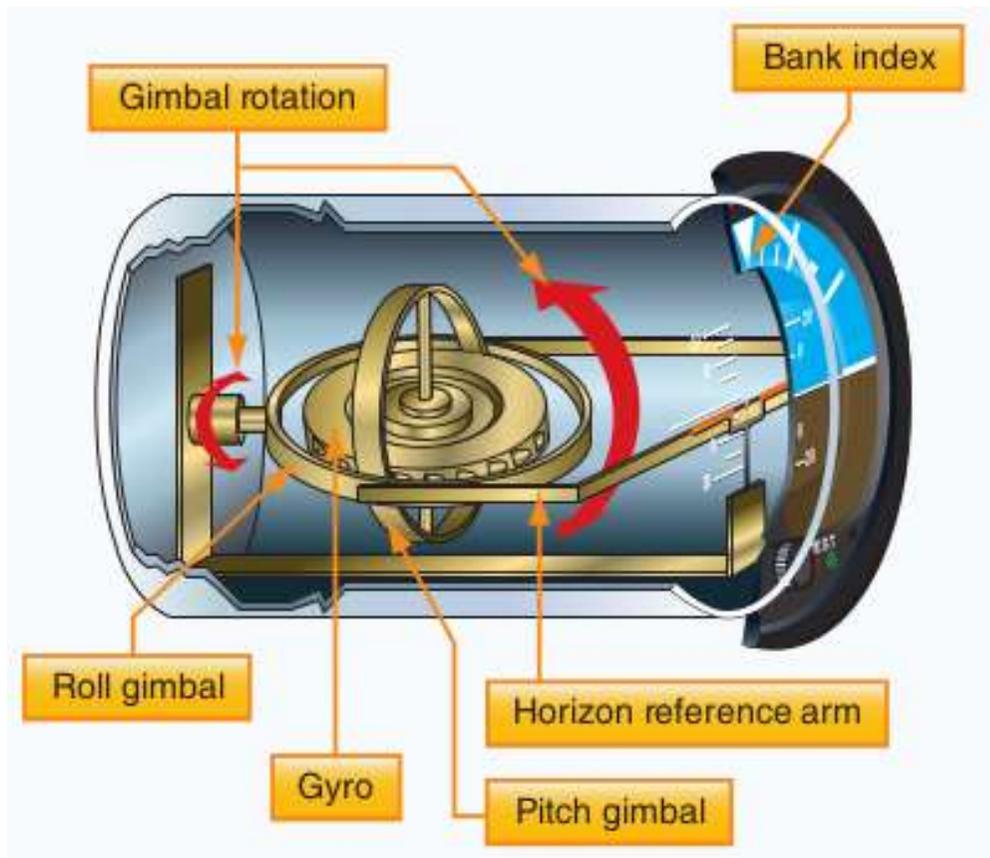


in : manuel du pilote de la faa (USA)

Sur un avion, la mise en rotation du gyroscope est pneumatique (pression ou au contraire **succion, contrôlée par un indicateur) ou électrique.**

La vitesse de rotation $V_r = 10\ 000$ à $20\ 000$ tr/mn

L'horizon artificiel



In : Le manuel du pilote de la faa (USA)

- gimbal = cardan
- roll = roulis
- pitch = tangage
- bank index : indicateur de virage

- Constitué d'un **gyroscope à 2 degrés de liberté** monté sur cardan et relié à une représentation de l'horizon.

L'horizon artificiel

- **Tous les avions, sont munis de cet instrument.**



- **Une maquette liée à l'avion permet de visualiser la position (l'attitude) de l'aéronef dans l'espace.**
- **Le pilote en vol sans visibilité se sert de cet instrument comme de l'horizon en vol à vue.**
- **Le gyroscope précessionne (se décale). Il faut le recalibrer régulièrement et éviter les manœuvres trop brusques.**

L'horizon artificiel

Les instruments les plus récents ont un affichage digital et les plus modernes utilisent des gyrolasers ne comprenant plus de parties mobiles.



Ceux ci sont plus fiables dans le temps et lors des évolutions serrées.

Dans les avions modernes équipés pour le vol aux instruments, l'EFIS (PFD) regroupe autour de l'horizon artificiel les indications de vitesse, d'altitude, de cap et de vitesse verticale.

L'horizon artificiel apparaît également dans le Viseur Tête Haute (VTH) des avions qui en sont équipés.



L'horizon artificiel

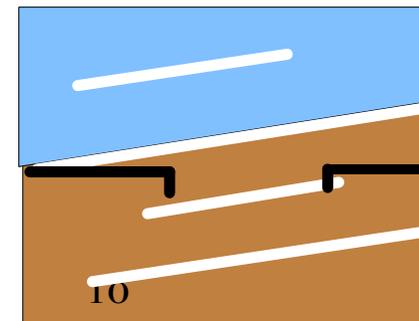
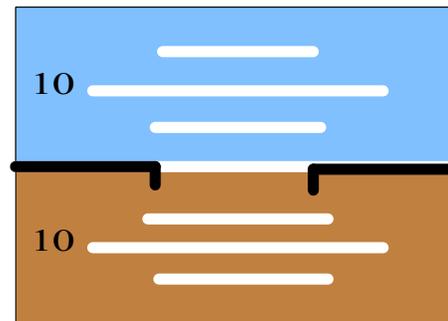
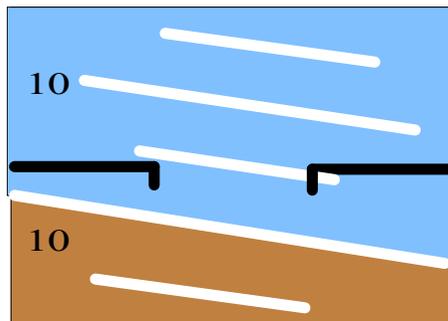
L'horizon artificiel mesure l'assiette de l'aéronef par rapport à l'horizon.

Est-ce que je monte ou descend ?

Est-ce que je suis incliné ?

à droite ?

à gauche ?



Le conservateur de cap

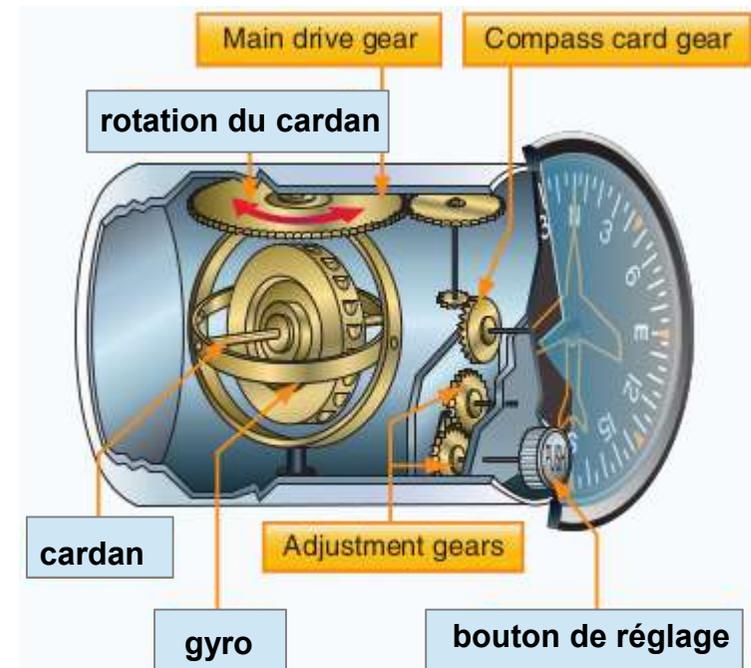
Nous avons déjà vu que le compas avait des limitations : indications erronées en montée, en descente et en virage.

Pour suivre un cap, il faut un instrument qui soit juste durant ces phases de vol. C'est le **conservateur de cap**.



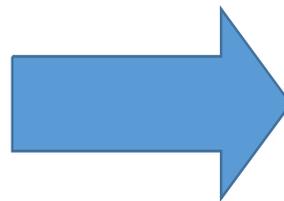
Le conservateur de cap (ou gyrocompas) est basé sur un gyroscope à 2 degrés de liberté à axe vertical. Il est calé sur la direction du N magnétique, et la garde.

L'erreur est négligeable jusqu'à 30° d'inclinaison.



Le conservateur de cap

- Comme tout instrument gyroscopique il nécessite des recalages réguliers.
- On le recale sur le compas magnétique, pendant les phases de vol rectiligne en palier.
- Le gyroscope précessionne lentement, mais se décale plus rapidement si on exécute des évolutions serrées.

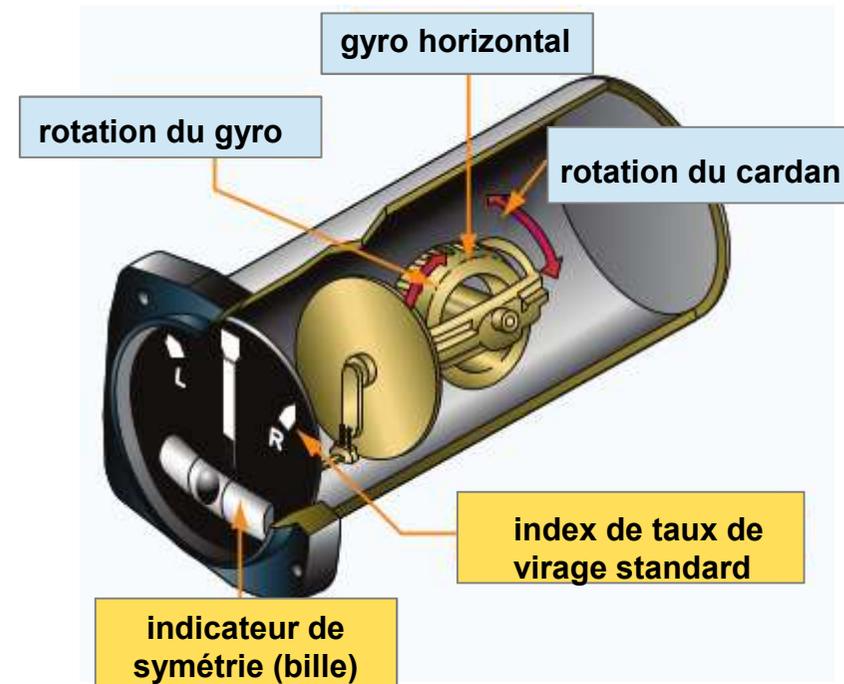


L'indicateur de virage

Il utilise un gyroscope à 1 degré de liberté

Cet instrument est utile en vol sans visibilité (VSV) ou pour effectuer des virages en un temps donné (virages à taux constant).

Virage "standard" : virage de $3^\circ/s$ ($180^\circ/mn$)



in : manuel du pilote de la faa (USA)

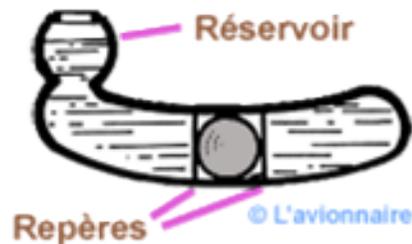
L'indicateur de virage peut visualiser le virage de 2 façons :

- une aiguille
- une maquette d'avion qui s'incline



L'indicateur d'inclinaison

L'indicateur de virage est généralement associé à un **indicateur d'inclinaison à bille.**



- La bille est constituée d'un tube légèrement courbé contenant une goutte de mercure immergée dans un liquide visqueux.
- En l'absence de dérapage, la bille est en bas du tube, entre 2 repères
- Lorsque l'avion est en dérapage, la bille est soumise à son poids et à une force transversale qui déplace la bille latéralement.
- Elle indique le côté d'où arrive le vent relatif

Maintenir le vol symétrique est important:

- permet de consommer moins d'essence
- le dérapage augmente la vitesse de décrochage et peut engendrer une vrille à basse vitesse

L'accéléromètre ou G mètre

Donne l'accélération subie par l'avion

Ne se trouve que sur les avions de voltige



3.4 L'instrumentation de bord

Son rôle

- **Pour régler et contrôler le bon fonctionnement du groupe motopropulseur**
- **Pour contrôler l'attitude, l'altitude et la vitesse de l'avion**
- **Pour naviguer**
 - **Les instruments de radionavigation**
 - **Le radiocompas**
 - **Le VOR**
 - **Le DME**
 - **L'ILS**
 - **Le transpondeur**
 - **Le GPS**

Instrumentes de radionavigation

Radionavigation:

Radio veut dire que l'on utilise des ondes radio

Navigation : pour naviguer



Les systèmes de radionavigation nécessitent souvent des installations/antennes sur le sol. Elles sont soumises au vent, pluie ... qui peuvent les endommager ou les dérégler. L'installation et la maintenance coûtent chers.



Certains systèmes de radio navigation sont en train d'être remplacés par le **GNSS (*Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites*)**

Instruments de radionavigation



Radiocompas : pour atteindre une balise il suffit de placer la flèche de l'indicateur dans l'axe de l'avion.

Il est **sensible aux perturbations météo**



VOR: Peut être utilisé pour la navigation et l'atterrissage de précision. Bonne fiabilité.

Il est insensible aux perturbations météo

Il existe 2 types de balises VOR:

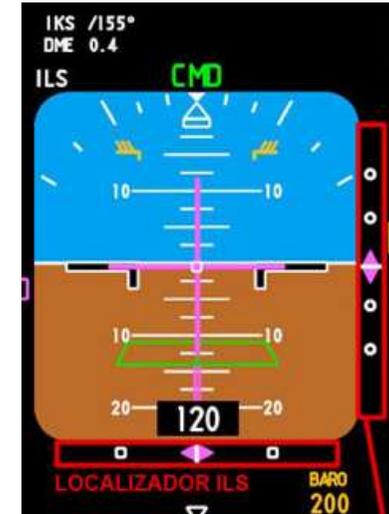
- les VOR de navigation (NAV)
- Les VOR terminaux (T) sur les terrains



Instruments de radionavigation

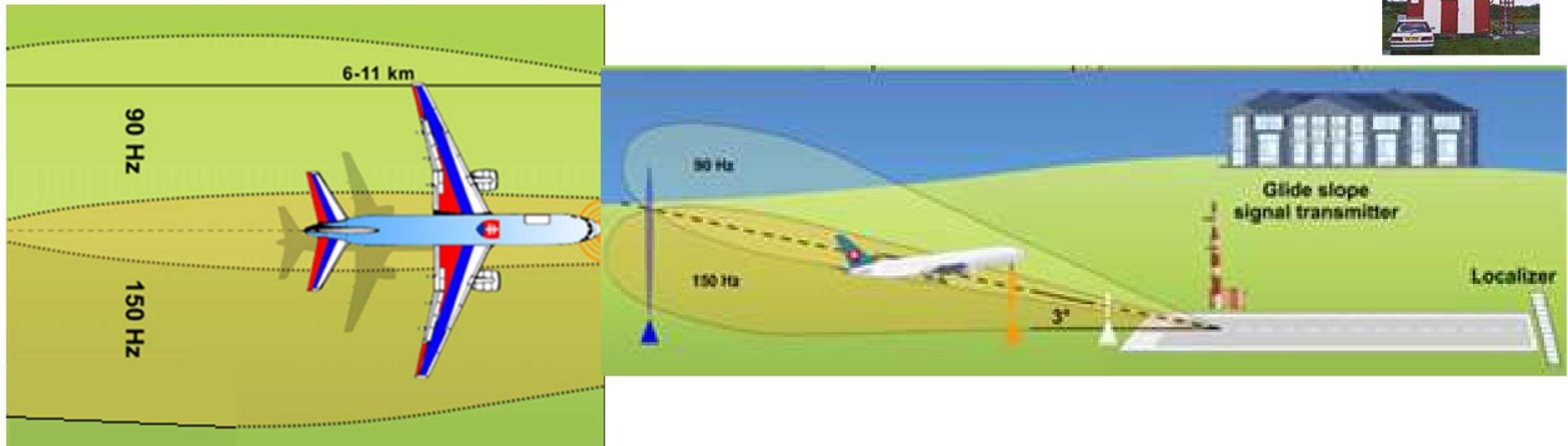
I.L.S. Une antenne au sol et un instrument dans l'avion.

Un moyen homologué pour se poser par visibilité très limitée, ou nulle.



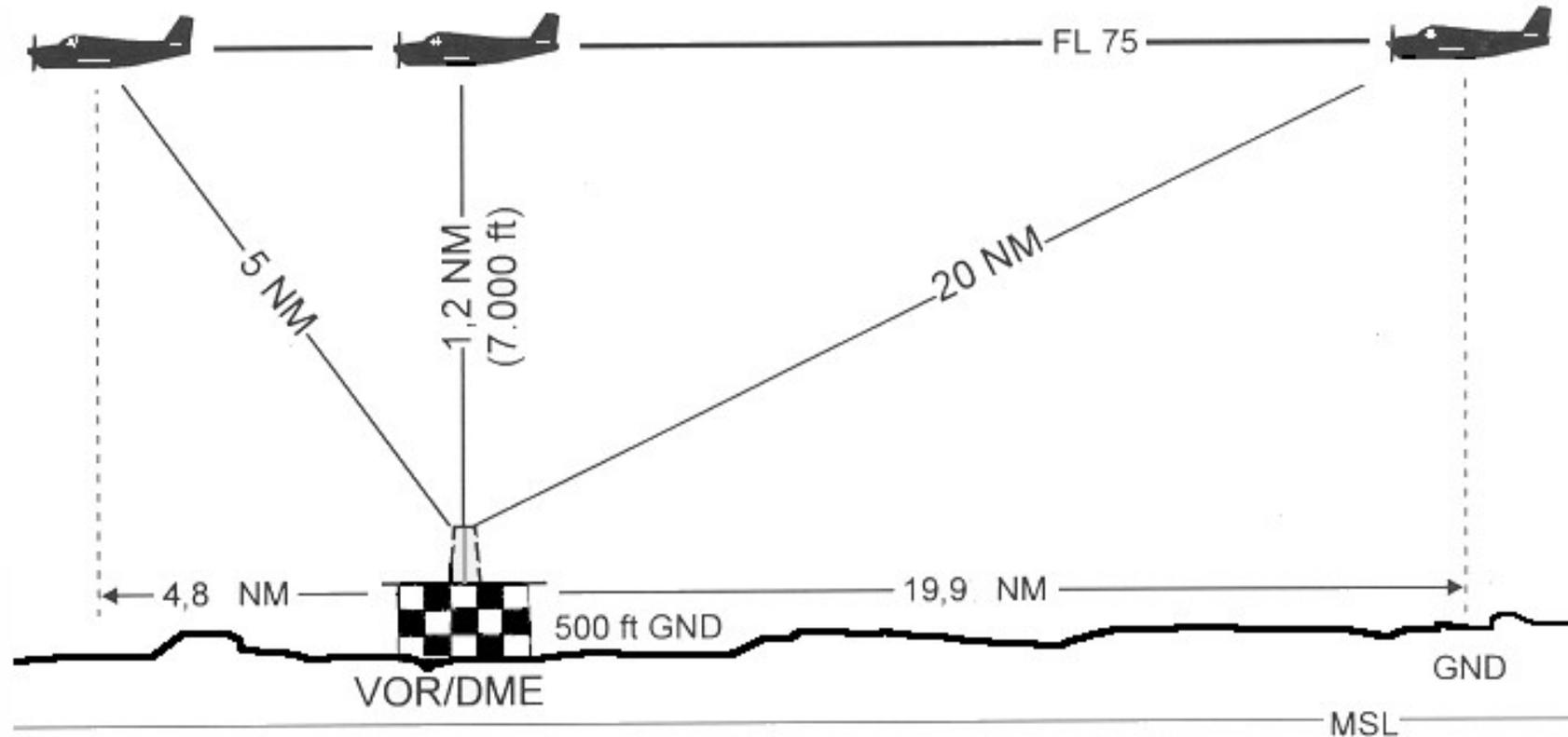
2 balises au sol

le **localizer** qui permet de repérer l'axe de piste
le **glide** qui permet de repérer le plan de descente.



Instruments de radionavigation

**Le DME (Distance Measurement Equipment)
toujours couplé à un VOR**



Le DME donne une indication de distance oblique entre l'avion et la balise

Le transpondeur

Appareil qui renvoie vers une station radar un code à 4 chiffres transmis par le contrôle. **Obligatoire dans certaines classes d'espaces aériens**

C'est un élément de sécurité qui permet au contrôleur d'identifier avec certitude un aéronef.



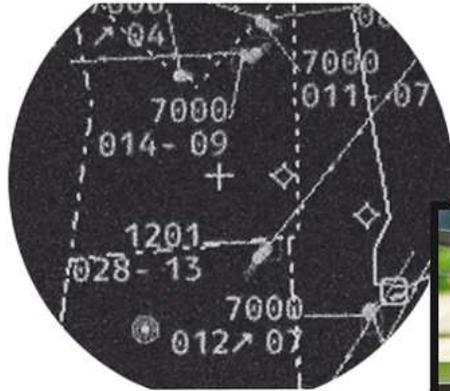
Des codes spéciaux :
7000 = avion en VFR
7600 = panne radio
7700 = détresse



Les transpondeurs les plus récents transmettent au contrôle, outre l'altitude, de nombreux paramètres du vol

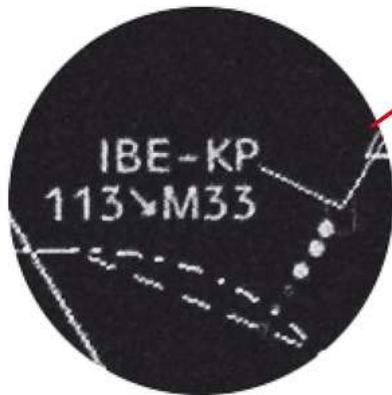
Le transpondeur

Ce que voit sur son écran le contrôleur au sol



Les codes « 7000 »

Liner compagnie IBERIA
en descente du niveau 113

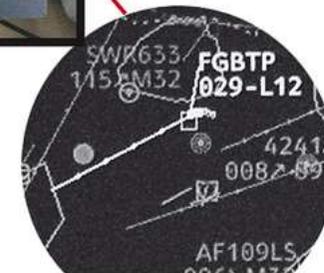


11/08/2025



French Air Force
Niveau 150

Aviation générale
F-GBTP
2 900 pieds QNH



in Wikipedia

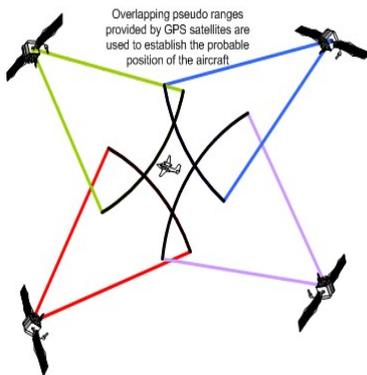
AIPBIA Instrument de bord

GNSS. Global Navigation Satellite System.

(Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites)



Pour bien naviguer au GNS l'avion doit « voir » un nombre suffisant de satellites (au minimum 4)

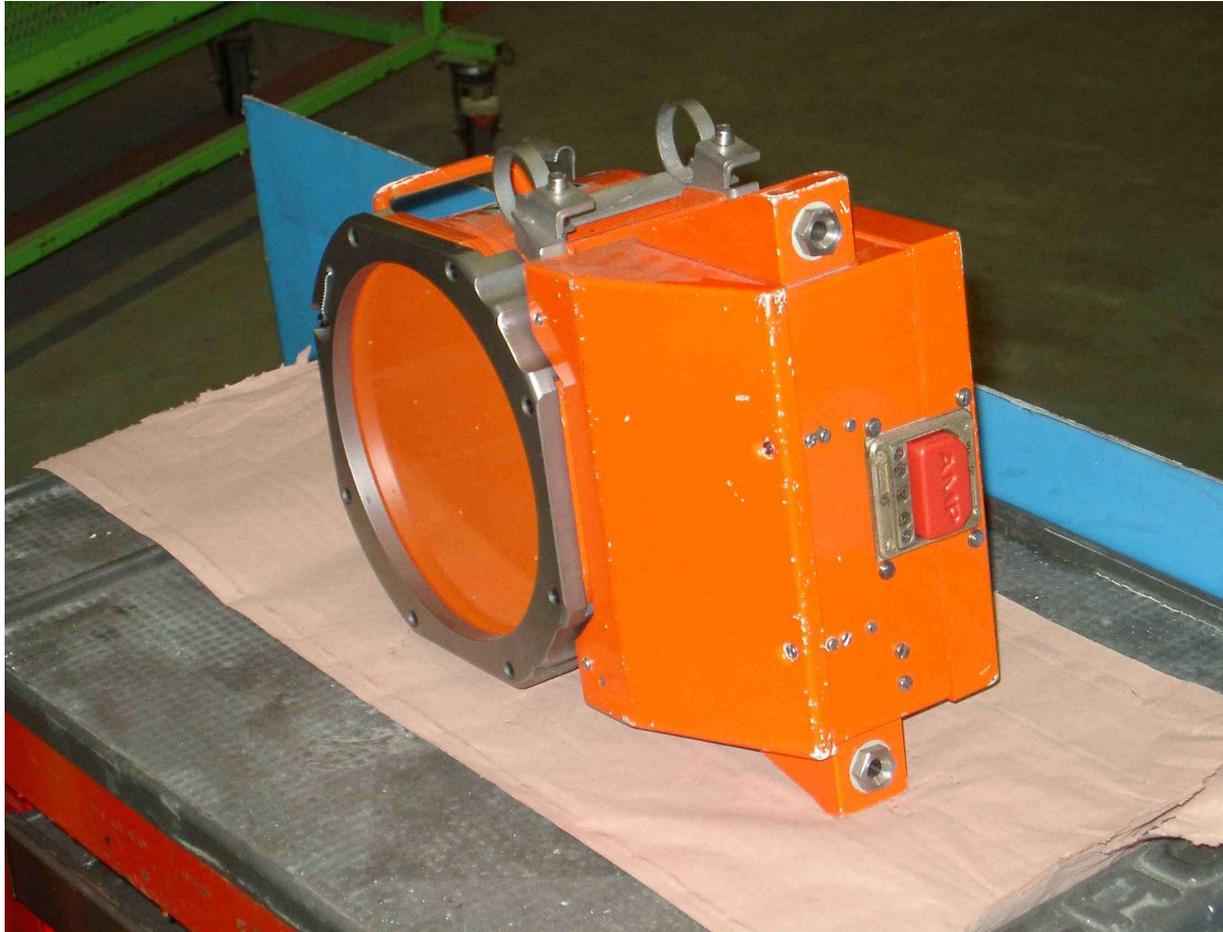


Aujourd'hui très fiable avec une couverture mondiale.

En train de devenir le moyen principal de navigation. Sa précision (< 1 m) a permis de le valider depuis 2011 comme moyen de navigation pour assurer des approches finales.

- Le GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) englobe plusieurs systèmes de navigation par satellite similaires au GPS (Global Positioning System (Américain, militaire en 1963, civil en 1995): le GLONASS (système russe), le Galileo (système européen) et le BeiDou (système chinois).
- Les satellites (orbite moyenne à une altitude d'environ 20 000 km) émettent des signaux radio précis contenant des informations sur leur position et l'heure. Les récepteurs GNSS, tels que les récepteurs GPS, captent ces signaux et utilisent les données pour calculer leur propre position, vitesse et heure avec une grande précision.
- Le fonctionnement des GNSS repose sur trois principes fondamentaux :
 - **Triangulation** : les récepteurs GNSS reçoivent les signaux émis par plusieurs satellites. En utilisant la différence de temps entre la réception des signaux de différents satellites et les données sur la vitesse de propagation des signaux radio, les récepteurs calculent leur position en triangulant leur position par rapport aux satellites.
 - **Éphémérides** : les satellites GNSS diffusent des données sur leur propre position orbitale, appelées éphémérides. Permet aux récepteurs GNSS de calculer avec précision la position des satellites par rapport à la Terre.
 - **Correction des erreurs** : les signaux GNSS peuvent être déviés ou retardés lors de leur passage à travers l'atmosphère terrestre. Les récepteurs GNSS utilisent des techniques mathématiques et des données provenant d'une station de référence connue.

Un enregistreur de vol : la boîte noire



Uniquement sur les avions commerciaux ou militaires. En réalité, 2 boîtes noires, de couleur vive : (1) enregistrement de ce qui se dit dans le cockpit, et (2) enregistrement de nombreux paramètres de vol. Complète la **balise de détresse**

Peut émettre un signal de position pendant 30 jours, y compris sous l'eau

Des exemples de QCM d'examen sur la partie de cours qui précède

Parmi ces instruments, celui qui utilise un gyroscope est :

- a) l'horizon artificiel
- b) le compas magnétique
- c) l'anémomètre
- d) le tachymètre

L'horizon artificiel fournit des indications sur :

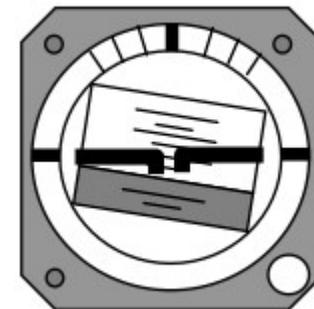
a)	les variations d'altitude.
b)	la symétrie du vol.
c)	la visibilité horizontale.
d)	l'assiette de l'avion et son inclinaison.

Le compas magnétique et le directionnel (conservateur de cap) n'indiquent pas le même cap :

- a) il faut régulièrement recalibrer le conservateur de cap (directionnel).
- b) il faut régulièrement recalibrer le compas magnétique.
- c) ce sont les perturbations magnétiques produites par les appareils électriques de bord qui dérèglent le directionnel.
- d) on ne peut pas voler dans ces conditions.

L'horizon artificiel représenté ci-contre indique que l'avion est incliné :

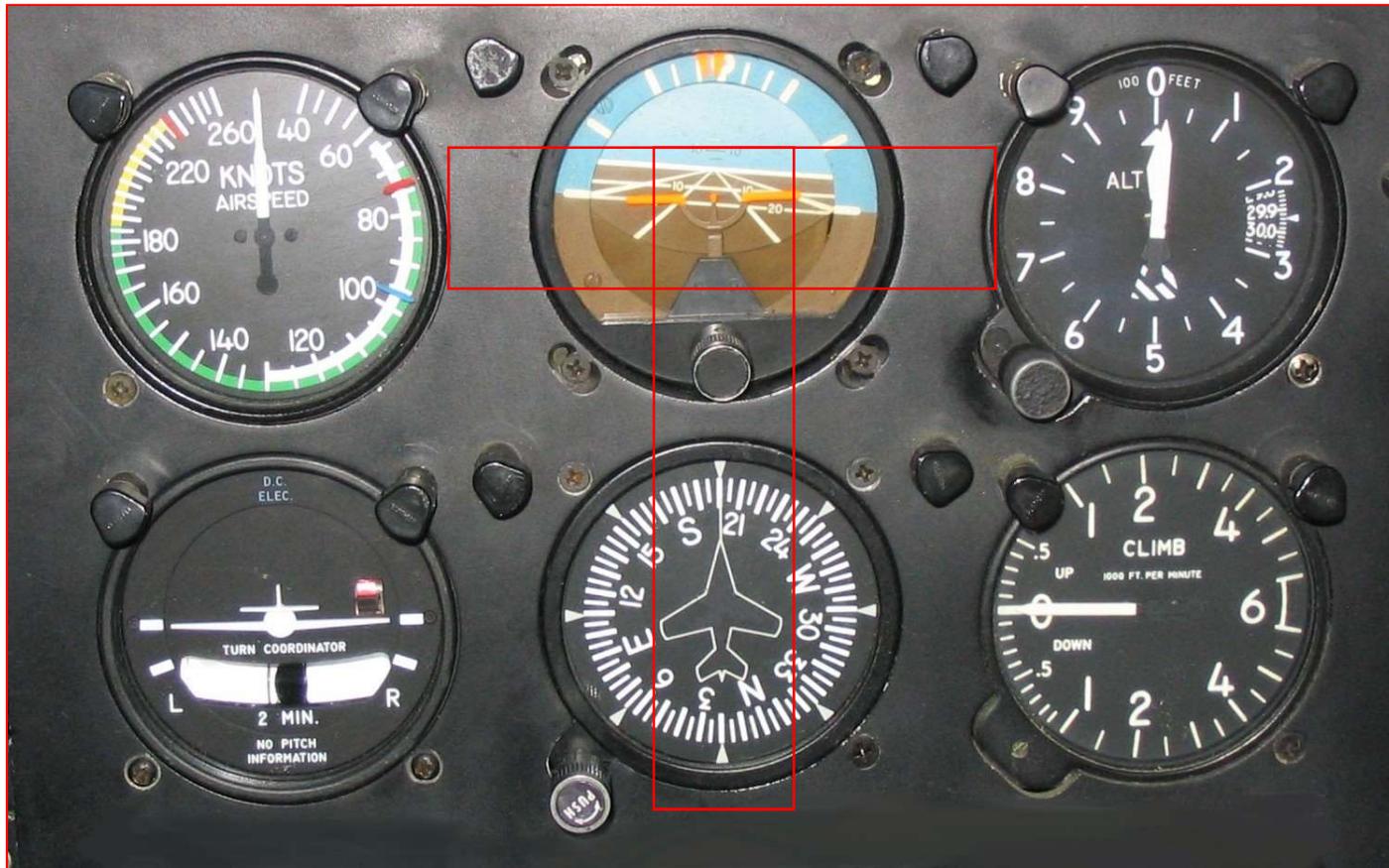
- a) à gauche avec une assiette à cabrer.
- b) à gauche avec une assiette à piquer.
- c) à droite avec une assiette à cabrer.
- d) à droite avec une assiette à piquer.



Pour aller plus loin

Ceci n'est pas au programme du BIA mais peut intéresser ceux qui veulent creuser un peu plus certains aspects du cours.

Disposition des instruments de bord

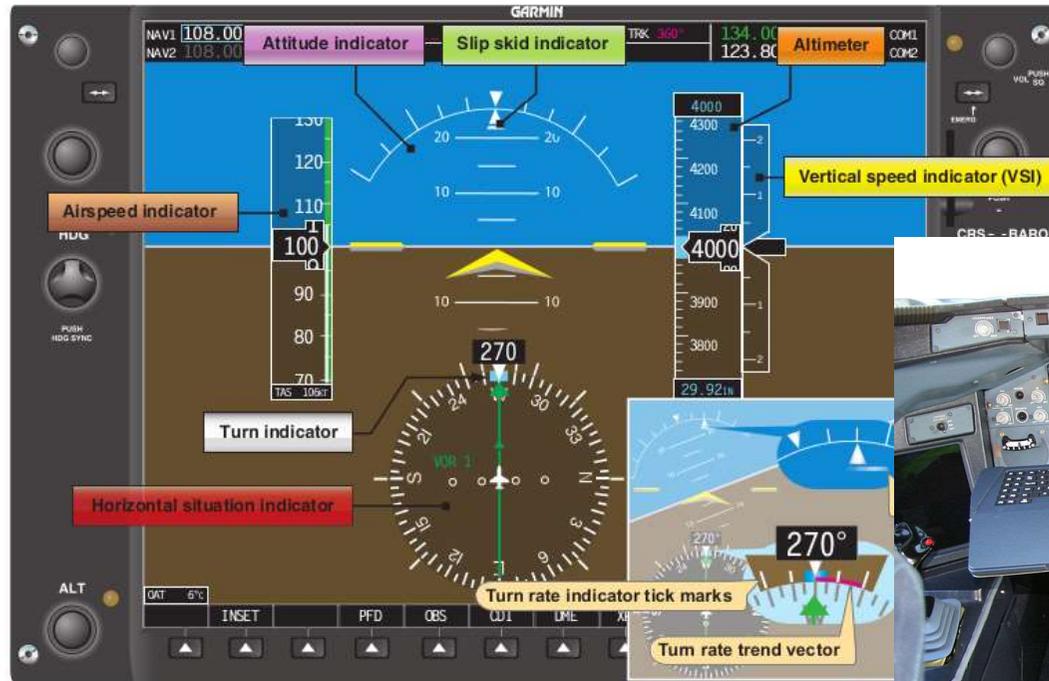


Pour faciliter la lecture des instruments (le "circuit des yeux") et augmenter la sécurité des vols les instruments sous forme "d'horloges" sont toujours disposés de la même manière quelque soit l'avion.

Les 4 instruments de base sont disposé en T : anémomètre, horizon artificiel, altimètre, et en dessous le conservateur de cap

Disposition des instruments de bord

Les "pendules" sont remplacées de plus en plus par des **EFIS**. Un **PFD** est un **EFIS** restreint aux paramètres de vol



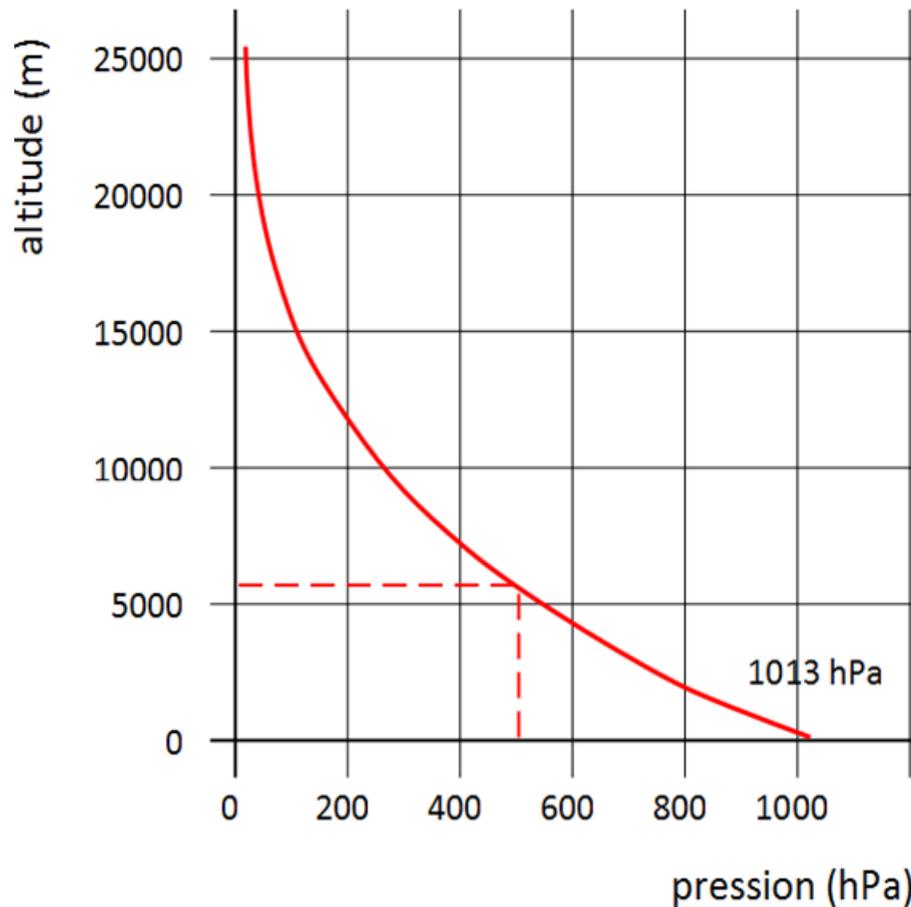
← PFD d'un avion léger

EFIS d'un cockpit d'A380 →



EFIS : Electronic Flight Information System (terme général)
PFD : Primary Flight Display (paramètres de vol)

Variation de la pression avec l'altitude



La pression atmosphérique diminue avec l'altitude selon une loi puissance.

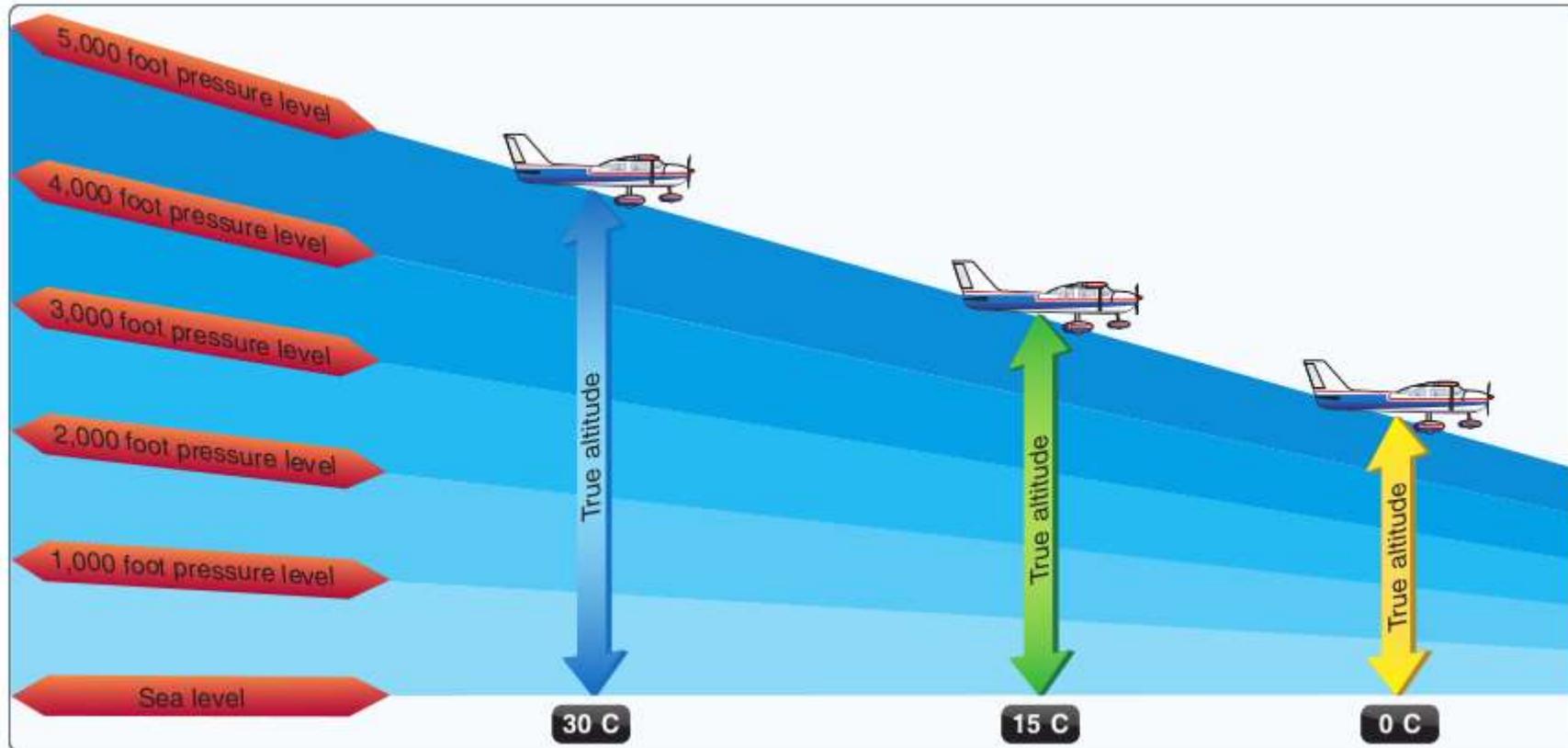
Pour que la pression diminue de 1 hPa, il faut monter de :

- 8,5 m (= 28 ft) au niveau de la mer et jusqu'à 2500ft
- 30 m (= 100 ft) vers 3 000 m (10 000 ft)

Vers **5500 m**, on n'est plus qu'à la moitié de la pression du niveau de la mer (**deux fois moins d'oxygène pour le pilote et pour le moteur !**)

La courbe ci-dessus correspond à l'atmosphère standard. Elle est réaliste pour nos latitudes, mais mène à des erreurs systématiques aux hautes latitudes (P plus basse) ou aux basses latitudes (P plus forte)

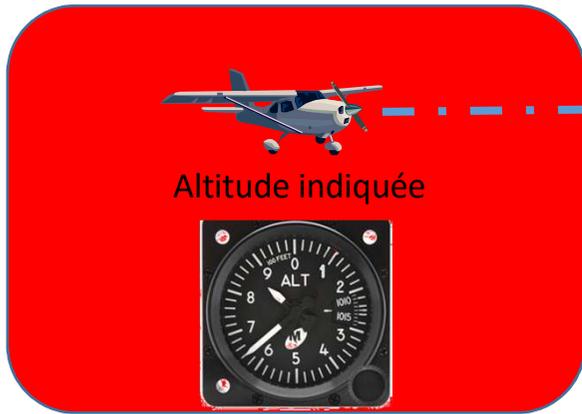
L'altimètre et les variations de température



Effets d'une température non standard sur l'indication de l'altimètre :
quand on vole vers un air plus froid que la température standard correspondant à l'altitude de réglage de l'altimètre, l'altitude réelle est plus faible que l'altitude indiquée par l'altimètre

in www.faa.gov/.../handbooks_manuals/pilotes handbook of aeronautical knowledge

aller plus loin



Altitude indiquée

Température Plus chaude



Altitude de vol Constante

Altitude indiquée

Température standard



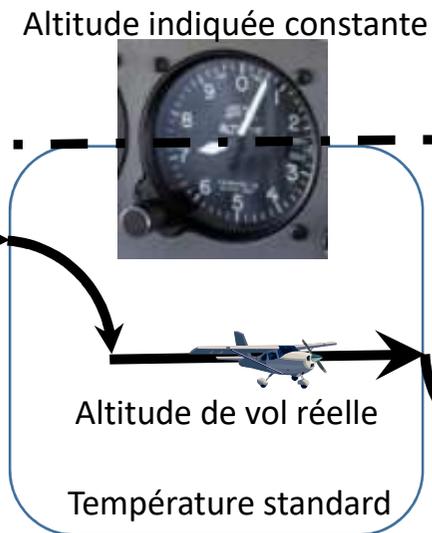
Altitude indiquée

Température plus froide



Altitude de vol réelle

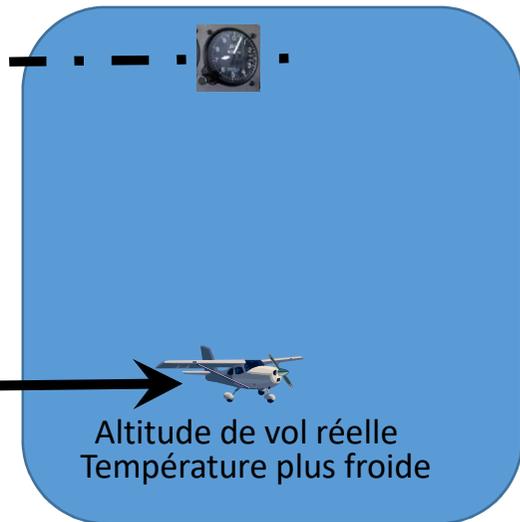
Température Plus chaude



Altitude indiquée constante

Altitude de vol réelle

Température standard



Altitude de vol réelle

Température plus froide

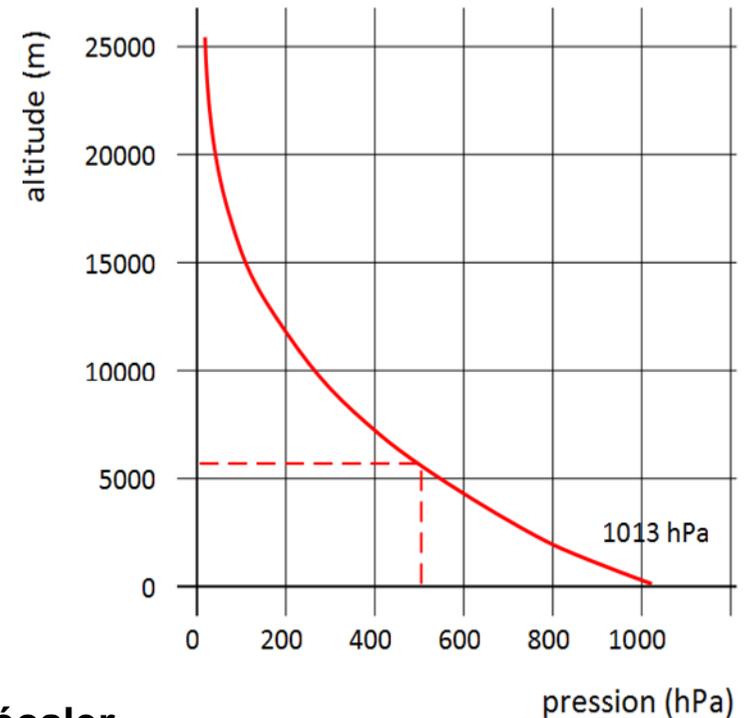
L'altimètre : calibration

Suivant sa calibration, il sert à mesurer la **hauteur**, l'**altitude** ou le **niveau de vol** d'un avion.

Dans ces 3 cas on utilise la mesure de la **pression d'air statique**, mais avec des calages différents du 0 de l'altimètre

Pour un même point la pression varie de jour en jour ou même d'heure en heure. Le calage de l'altimètre (**hauteur**, **altitude**) doit tenir compte des conditions météorologiques du moment, en particulier la température.

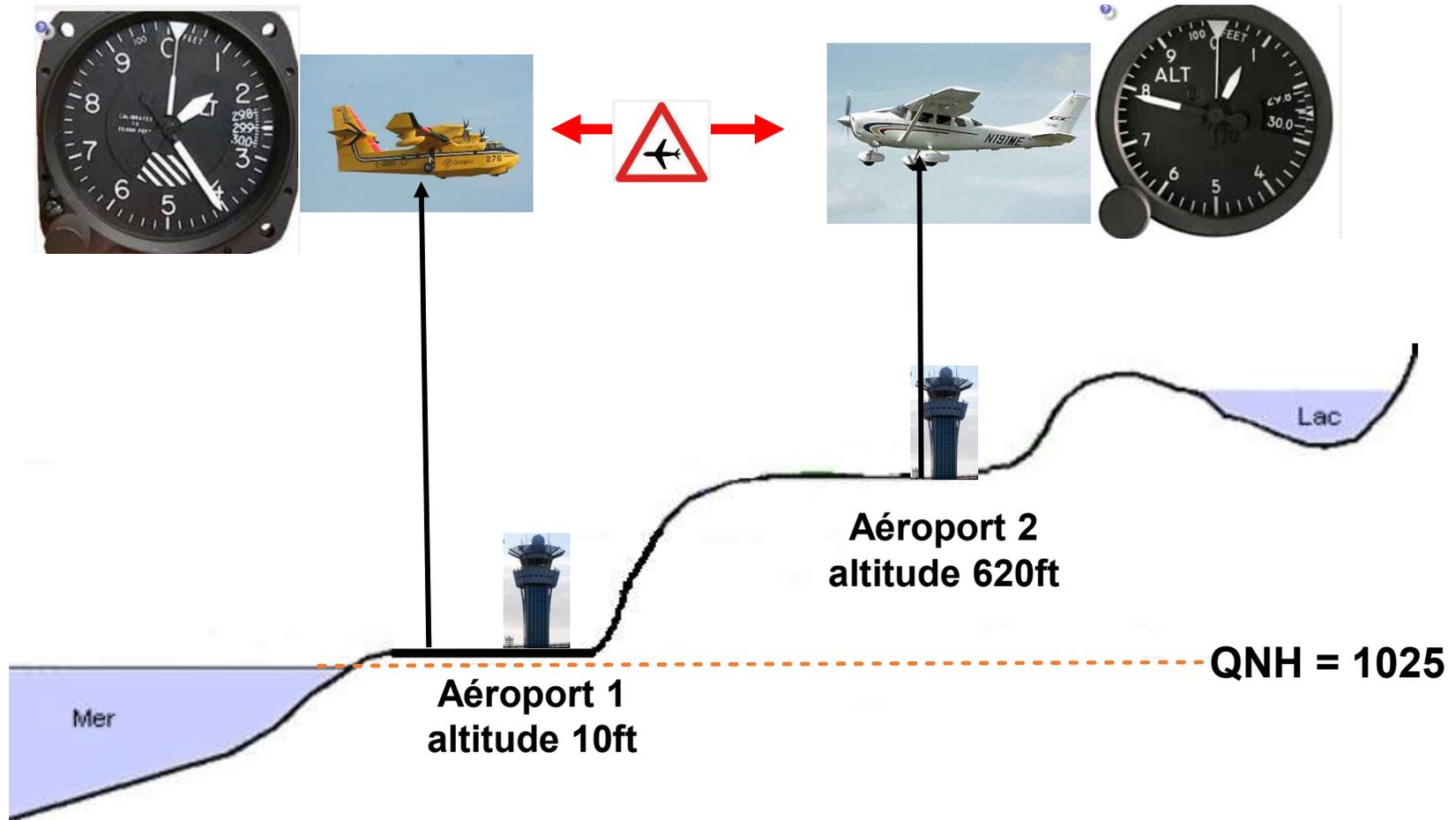
En dessous de 2000m (~ 6500 ft) d'altitude, la pression statique diminue d'environ **1 hPa tous les 28 pieds (8,5m)**.



Remarque : caler l'altimètre revient à décaler l'ordonnée à l'origine de la courbe altitude = f(pression)

aller plus loin

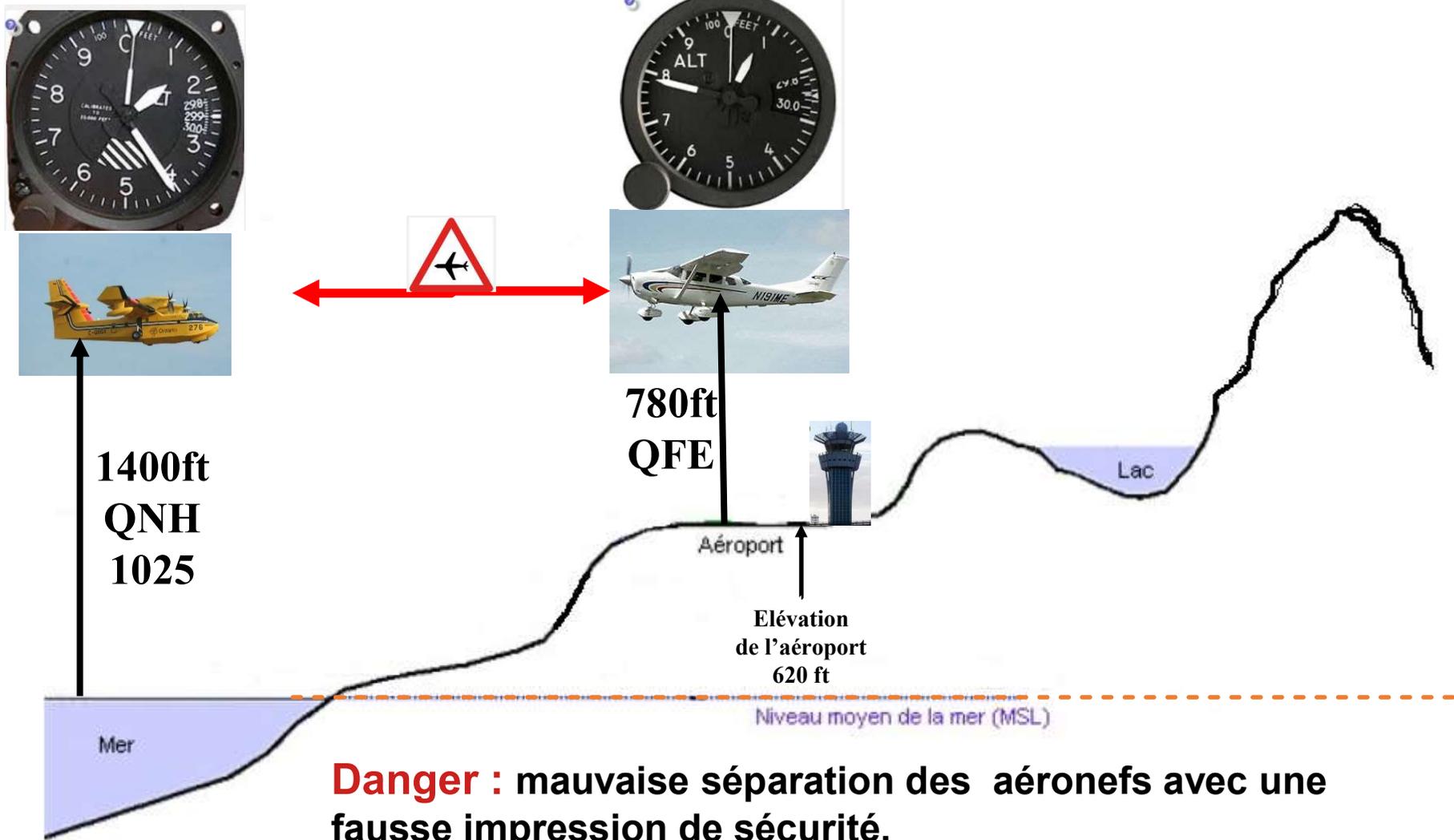
Sécurité altimétrique : attention au QFE



Danger :
Ne permet pas d'assurer la séparation des avions partant d'aérodromes d'altitude différentes

aller plus loin

Sécurité altimétrique : mélange QNH et QFE

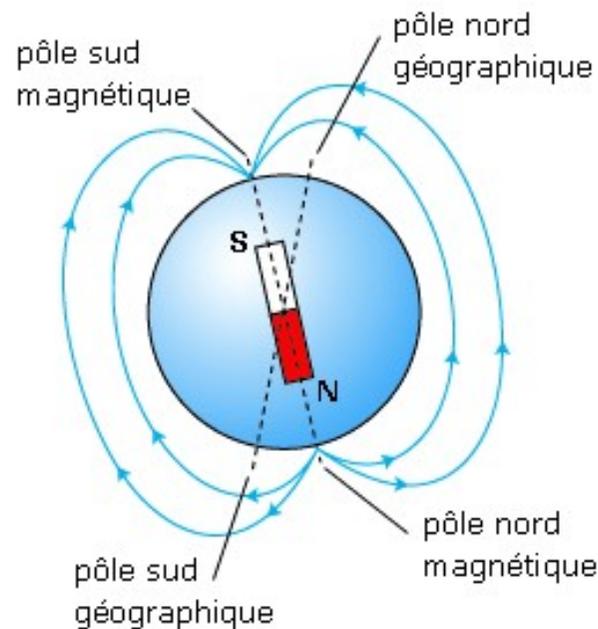


Danger : mauvaise séparation des aéronefs avec une fausse impression de sécurité.

Le champ magnétique terrestre

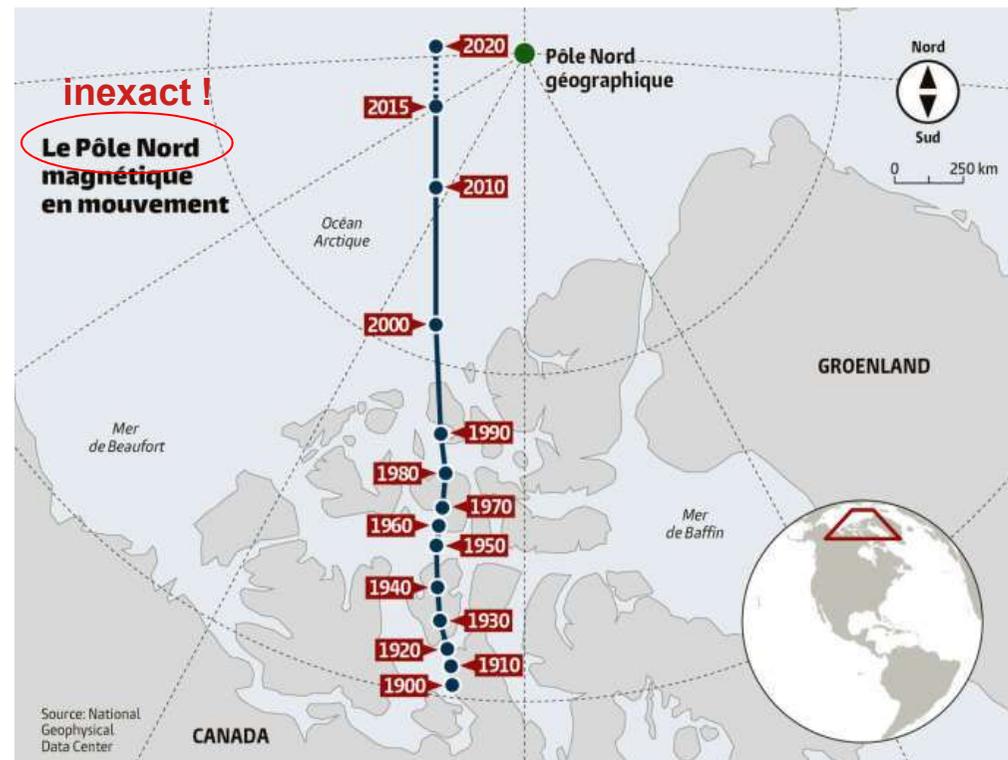
La terre est analogue à un barreau aimanté (dipôle), entouré d'un champ magnétique. L'axe du dipôle est oblique (20° en 1900, 4° en 2020) par rapport à l'axe N-S de rotation de la Terre

Ce dipôle est **instable en position** (la direction de l'axe N-S varie en permanence un peu \rightarrow la position des pôles magnétiques varie), et même en sens (inversions du champ magnétique terrestre à échelle de temps de plusieurs milliers d'années : à quand la prochaine ?)



Près des pôles, l'inclinaison des lignes de champ rend la boussole inutilisable

On parle souvent du pôle Nord magnétique en le situant près du pôle Nord géographique. En réalité **le Nord géographique = le Sud magnétique**



aller plus loin

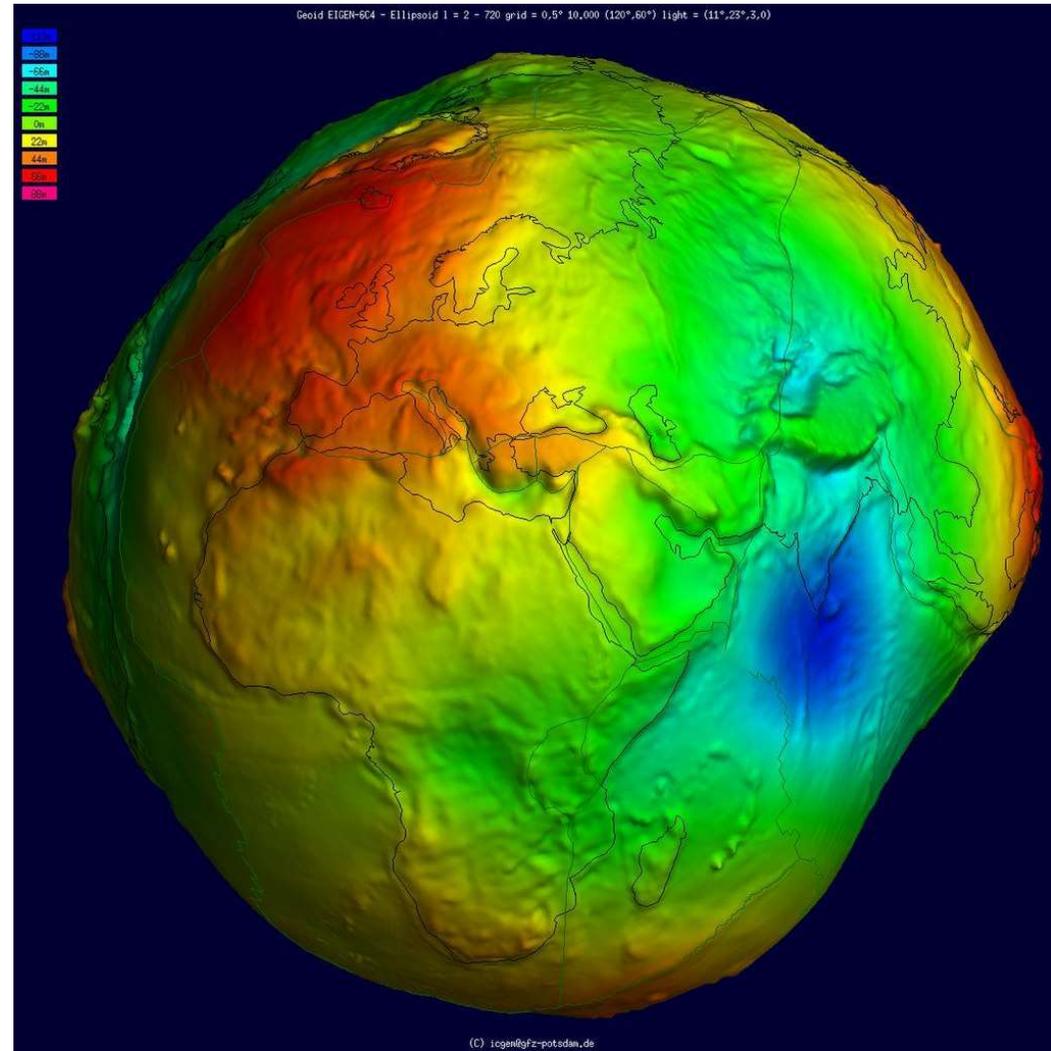
Le GPS

La Terre n'est pas une boule régulière (des creux et des bosses). Sa forme lissée est appelée le **géoïde**

Le positionnement GPS se fait lui par rapport à un ellipsoïde géodésique idéal

Avec le système WGS 84, l'écart entre le géoïde et l'ellipsoïde de référence peut atteindre 100m ! (en France, "bosse" du géoïde de l'ordre de + 50m)

L'écart entre l'altitude donnée par les cartes et l'altitude fournie par le GPS est le GUND ("geoid undulation"). Il faut en tenir compte si on utilise le GPS comme moyen d'approche terminale

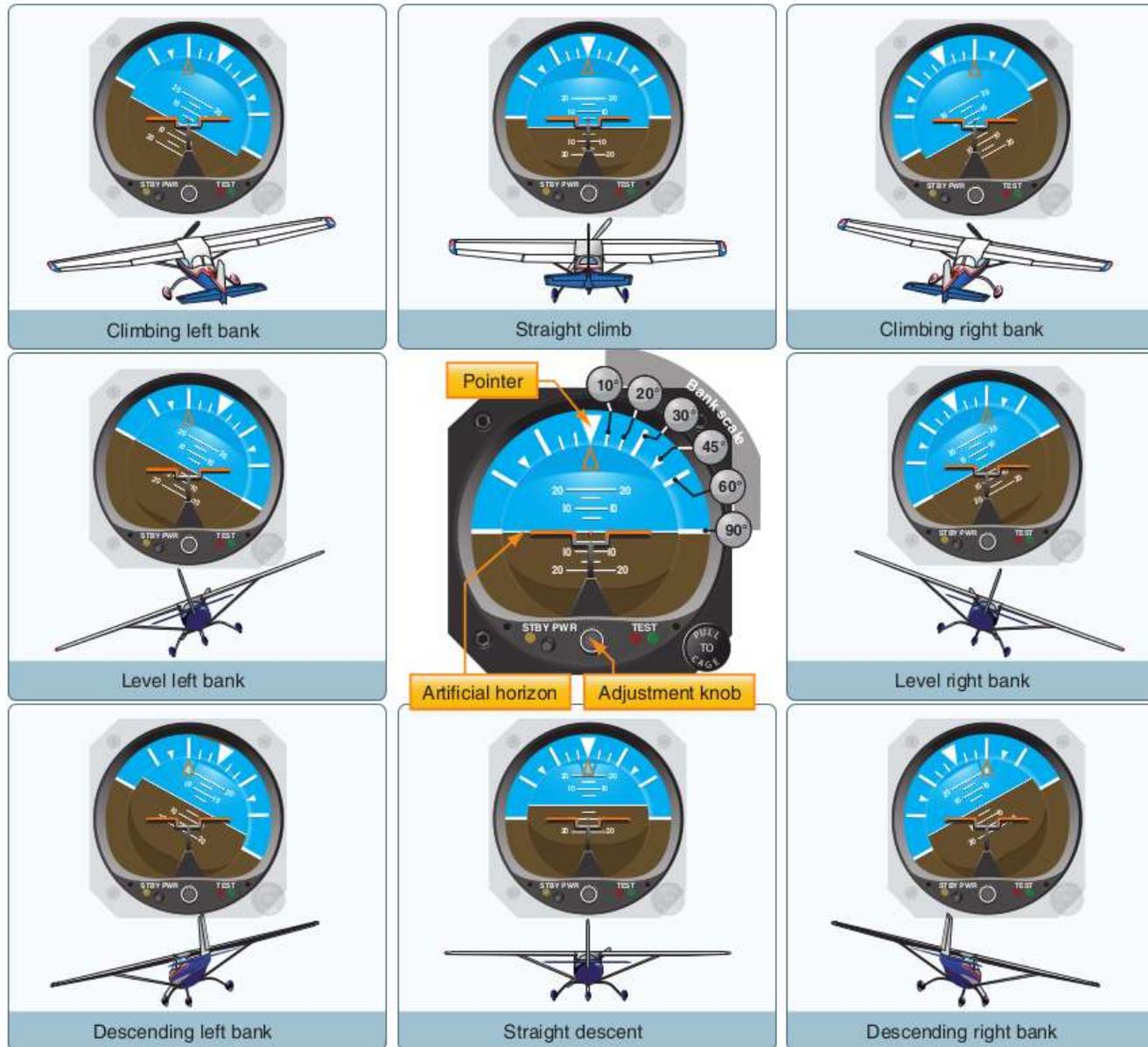


Le GUND est donné sur certaines cartes de terrain (ici : Macon LFLM, GUND = 160ft).

Le GPS

- Les satellites du système GPS émettent deux types de code : le code dit C/A (Clear Access) identifiable par tous les récepteurs est émis à la fréquence de 1 milliseconde (=il est répété 1000 fois par seconde) et le code dit P (Precision) réservé aux forces armées des Etats-Unis. De leur côté les satellites du système Galileo émettent trois types de code : un code en accès libre analogue au C/A américain, le code PRS (Public Regulated Service) réservé aux applications gouvernementales et militaires et le code CS (Commercial Service) réservé aux applications commerciales à accès payant.
- Les signaux radio émis par les satellites de navigation des systèmes GPS et Galileo transmettent différents types de message : almanach (position approximative des satellites de la constellation utilisée pour un premier traitement des signaux reçus), éphémérides (position précise du satellite), correction d'horloge (retard ou avance de l'horloge du satellite par rapport au temps système) et paramètres de correction ionosphérique. Ces données sont transmises avec un débit très faible (50 bits par seconde pour le signal C/A du GPS et 125 bits par seconde pour Galileo) ce qui génère un délai de 12 minutes pour la réception de toutes ces informations par les satellites GPS et cinq minutes par les systèmes Galileo.
- Chaque satellite émet dans trois fréquences qui sont propres à chaque système de navigation par satellites. Par exemple les satellites Galileo émettent les signaux radio L1 (dans la fréquence 1 575,42 MHz), E6 (1 278,75 MHz) et E5 (1 191,795 MHz).
- Pour déterminer la distance entre le satellite et le récepteur, connaissant les paramètres de la trajectoire que suit le satellite, il faut théoriquement que l'heure des satellites et du récepteur soit identique. La précision de cette synchronisation est vitale. En effet, compte tenu de la vitesse à laquelle circule le satellite (plusieurs kilomètres par seconde), une désynchronisation de 1 microseconde entre l'horloge du satellite et celle du récepteur engendre une erreur de calcul de la position de 300 m.

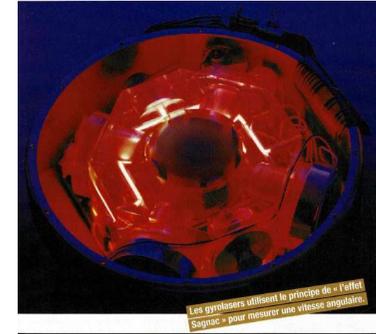
L'horizon artificiel



LASERS ET VIBRATIONS POUR GUIDER LES AVIONS

- **La centrale à inertie.**
 - **Son rôle:** calculer avec précision l'attitude et la position d'un avion, d'un hélicoptère de manière autonome, c'est-à-dire sans avoir recours aux satellites GPS, ou encore à une balise de radionavigation.
 - Pour cela, elle utilise un ensemble de capteurs inertiels, généralement trois **gyroscopes** et trois **accéléromètres**, dont les données brutes sont ensuite traitées par de puissants calculateurs afin d'en tirer des informations de cap et d'attitude, d'altitude, de latitude et de longitude, qui serviront au pilote pour effectuer sa navigation.
 - Plusieurs technologies sont disponibles pour la fabrication de ces équipements.
 - la « bonne vieille » centrale mécanique, dotée de gyroscopes à toupie. Véritable merveille d'horlogerie. (DTG) 1960.
 - les gyrolasers (R.LG) 1990
 - les gyroscopes résonnants hémisphériques (GRH)
 - les gyroscopes à fibre optique (FOG)

Gyrolaser



- Le mètre étalon dans le domaine.
 - Précision de l'ordre de 0,5Nm par heure de navigation.
- Système à l'état solide, c'est-à-dire sans partie mobile, donc particulièrement insensible aux chocs.
- **Le principe:** deux rayons lasers parcourent, en sens opposé, une cavité fermée par des miroirs et contenant un mélange de gaz hélium-néon. Si l'ensemble est animé d'un mouvement de rotation dans son plan, sous l'effet de la relativité restreinte, les deux ondes lumineuses, l'une voyageant dans le sens de la rotation et l'autre dans le sens inverse, mettront des temps différents pour parcourir la cavité. La différence sera mesurée grâce à un système interférométrique. Ce phénomène physique, découvert il y a tout juste cent ans, porte le nom «d'effet Sagnac » et est mesurable à l'aide d'un détecteur photoélectrique, qui produit donc une mesure de vitesse angulaire. Ainsi, en disposant trois capteurs gyrolasers en trièdre, il est possible de déterminer les mouvements d'un objet par rapport à ses trois axes.

Gyroscope vibrant hémisphérique, ou GRH.



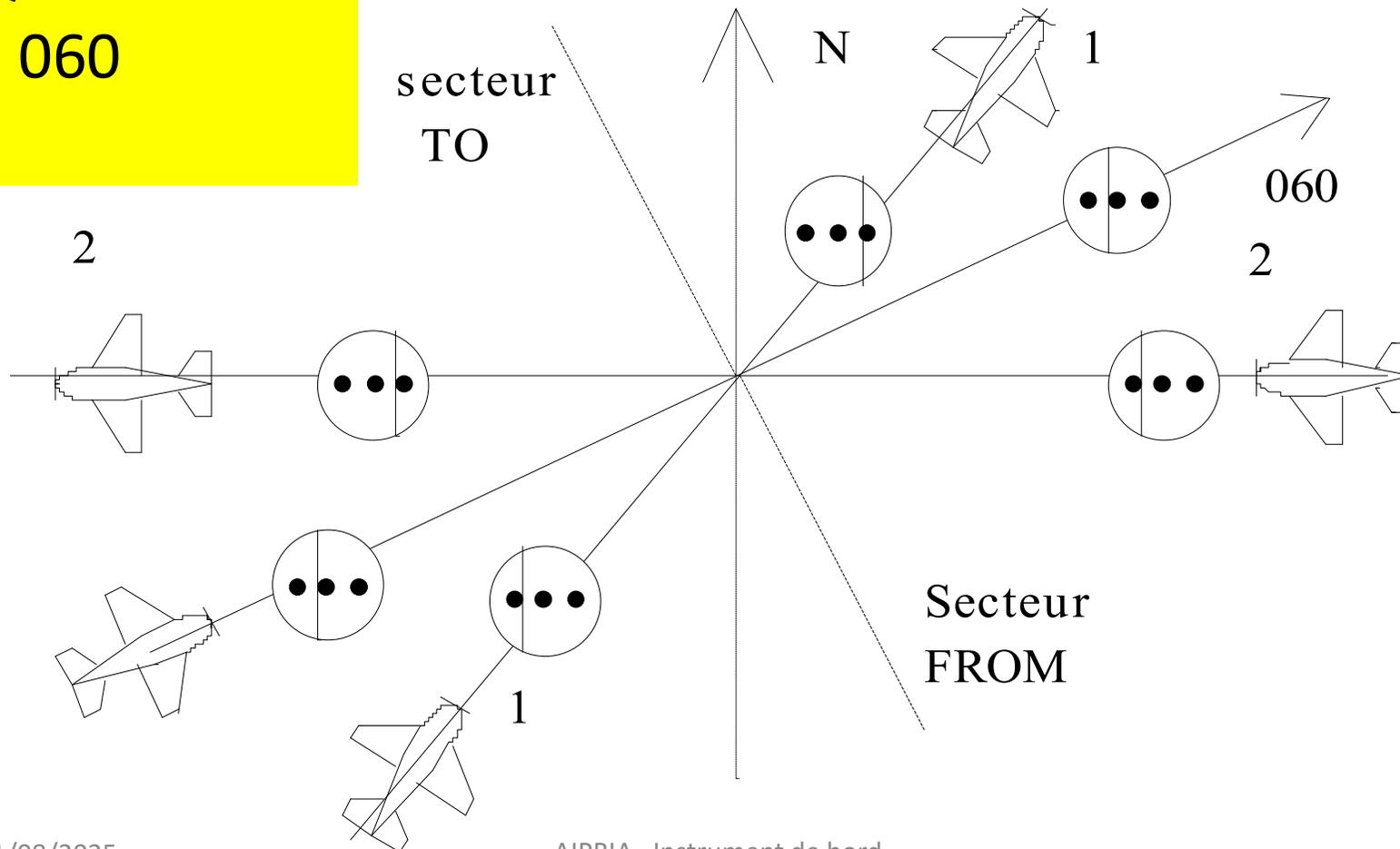
- **Son principe:** mesurer la vibration d'une demi-sphère miniature en silice maintenue en résonance. Et à la manière du vénérable pendule de Foucault, le GRH verra la position de la vibration modifiée lorsqu'il effectuera un mouvement de rotation autour de son axe de symétrie. C'est cette variation de position qui est mesurée au moyen de capteurs électrostatiques et qui constitue une information de vitesse angulaire. L'avantage du GRH, c'est que c'est un composant extrêmement robuste, qui n'est soumis à aucune usure mécanique, offrant ainsi ~ une durée de vie virtuellement illimitée.
- Amélioration du système: Gyroscope vibrant à poutre (GVP) constitué d'un double diapason.

aller plus loin

Le VOR



QDM affiché
= 060



**Ce module a été conçu et réalisé par un groupe de passionnés,
Merci à eux. Nous avons utilisé de nombreuses sources et documents dont:**

Productions de l'Académie de Bordeaux. Bernard GUYON, Stéphane MAYJONADE

<http://blog.crdp-versailles.fr/brevetinitiationaeronautique/>

<http://www.lavionnaire.fr/>

http://biacalais.free.fr/cours/Connaissance_Aeronefs-V2.pdf

Cours BIA Lycée Marie Curie et Aéroclub du Dauphiné. Grenoble.

Site commerciaux fabricants avion, hélicoptère, ULM, Voile ...

<https://fr.wikipedia.org>

Fiches de Laetitia Souteyrat

Fiches de Charles Pigaillem

Franck.cazaurang@ims-bordeaux.fr/1_Tech_Struct_Aero.pdf

<http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables>

<http://federation.ffvl.fr/pages/brevet-dinitiation-aeronautique-bia>

**[https://fr.wikipedia.org/wiki/Instrument_de_bord_%28a%C3%A9ronautique%29#/media/](https://fr.wikipedia.org/wiki/Instrument_de_bord_%28a%C3%A9ronautique%29#/media/File:Airbus-319-cockpit.jpg)
[File:Airbus-319-cockpit.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Instrument_de_bord_%28a%C3%A9ronautique%29#/media/File:Airbus-319-cockpit.jpg)**

Air et Cosmos magazine N° 2353 Avril 2013