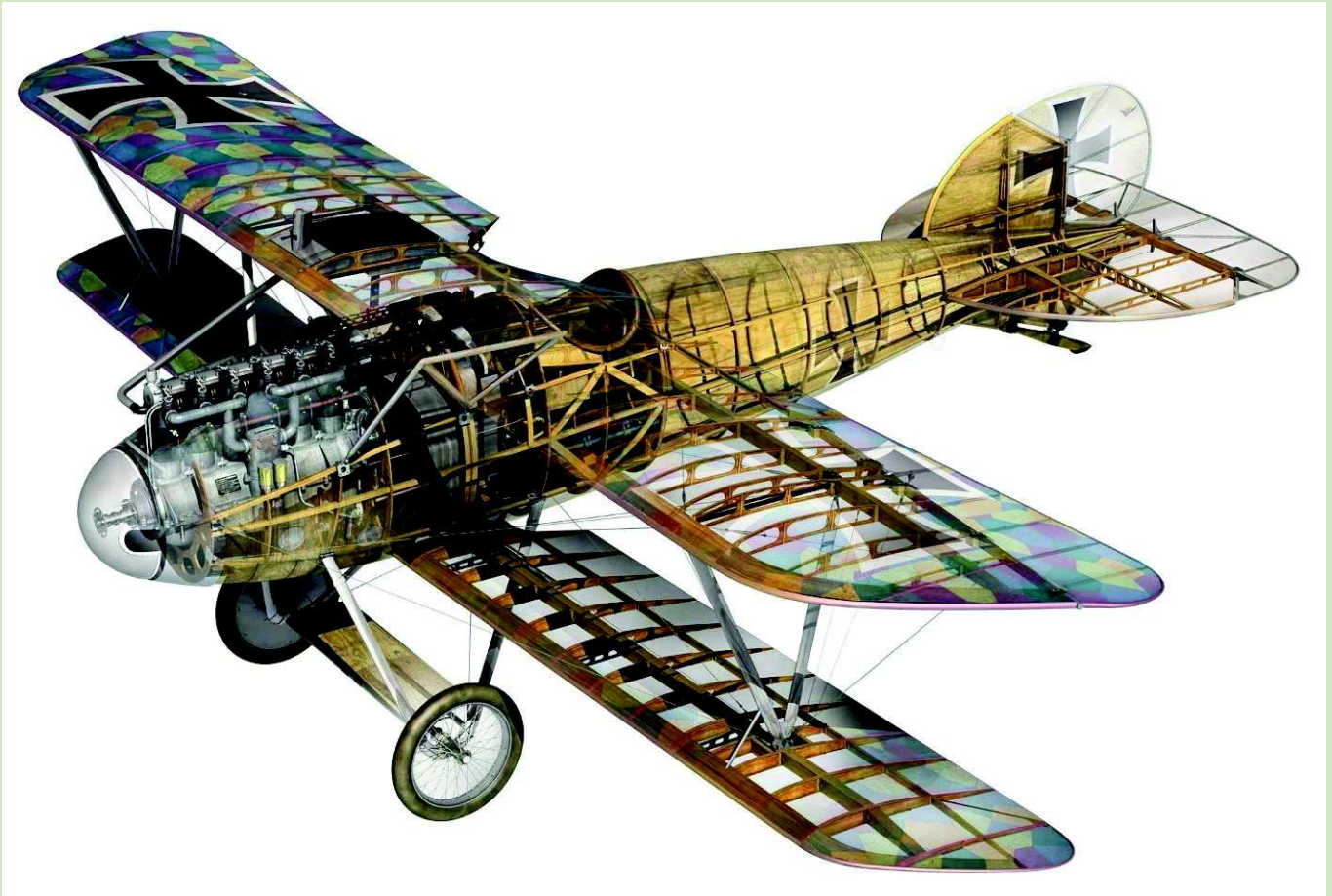


Connaissances des



Aéronefs



Illustrations page de couverture :

Ecorché d'un biplan datant de la première guerre mondiale :

L' Albatros D.V.



Présentation du document & auteurs.

Ce cours AMV est basé sur les polycop, réalisés par Laurent Lespiac, et initialement distribués par la DAFA de Montpellier.

Les premiers documents numériques ont été réalisés, mis en page, complétés et illustrés par Gérard Pujol puis relus par Sofiane Bouafia pour l'atelier aéronautique du lycée Jean Monnet de Montpellier. Notez aussi que, ces dernières années, un nouveau site internet : <http://www.lavionnaire.fr/> m'a énormément servi à illustrer et compléter cette série de document.

La version Word (modifiable) permet une pagination et l'ajout d'un index. Le fonctionnement est explicité en dernière page.



Illustrations & Copyrights.

Une grande partie des images sont extraites d'ouvrages existants ou d'internet. Les schémas ont pour la plupart été repris sur des bases existantes... mais très souvent modifiés ou complétés.

Si malgré tout, l'auteur d'un schéma, d'une image ou d'une photo pense que l'on est en infraction avec les lois sur les copyrights, il est prié de contacter le service académique (DAFA) de Montpellier pour demander à ce que l'illustration (préciser le titre du document et la page SVP) posant problème soit retirée du polycop.

Nous remplacerons le plus rapidement possible cette illustration.



Plan du cours - Table des matières simplifiée

Présentation du document & auteurs.....	2
Illustrations & Copyrights.....	2
I.1- Généralités sur les aéronefs.....	5
Les différents objets volants.....	5
Les U.L.M.	7
Vol libre : parapentes Delta ... Kite.....	9
I.2- Généralités sur les aéronefs.....	12
L'avion (principales parties).....	12
Compléments sur la structure du fuselage (CAEA).....	22
Winglets, fences et tourbillons.(CAEA).....	27
II.1- Les instruments de bord.....	37
Instrument utilisant des gyroscopes.....	37
II.1.1- Les instruments de bord.....	38
L'horizon artificiel.....	38
II.1.2- Les instruments de bord.....	39
Le conservateur de cap.....	39
II.1.3- Les instruments de bord.....	40
L'indicateur de virage.....	40
II.2- Les instruments de bord.....	41
Instrument utilisant des mesures de pression.....	41
II.2.1- Les instruments de bord.....	42
L'altimètre.....	42
II.2.2- Les instruments de bord.....	43
L'anémomètre ou badin.....	43
II.2.3- Les instruments de bord.....	47
Le variomètre.....	47
II - Compléments sur les instruments.....	51
Servitudes pression et gyroscopes.....	51
II.3- INSTRUMENTS DE BORD.....	52
LE COMPAS.....	52
II.4- INSTRUMENTS DE BORD.....	53
Compléments divers.....	53
II.5- INSTRUMENTS DE BORD.....	56
Autres instruments et circuit visuel.....	56
III-LE GROUPE MOTOPROPULSEUR.....	59
Les moteurs à explosion.....	59
L'hélice.....	62
III-LE GROUPE MOTOPROPULSEUR.....	65
Les servitudes. Le circuit carburant.....	65
III-LE GROUPE MOTOPROPULSEUR.....	70
Les servitudes : le circuit électrique.....	70
III-LE GROUPE MOTOPROPULSEUR.....	72
Les moteurs à réaction.....	72
IV - Le givre... et le dégivrage.....	78
Les servitudes : le dégivrage.....	78
IV - Le freinage à l'atterrissage.....	84
Train, parachute, reverses... et brins d'arrêt (CAEA).....	84
V- Fusées et engins spatiaux.....	88
VI - Les hélicoptères.....	102
Et leurs cousins à voilure tournantes.....	102
Conseils d'utilisation.....	123

I.1- Généralités sur les aéronefs.

Les différents objets volants...



Tous les appareils capable de s'élever et de circuler dans l'espace aérien sont des aéronefs. On distingue : les **aérodynes** dont la sustentation résulte des **forces aérodynamiques**, les **aérostats** dont la sustentation est principalement assurée par la **poussée d'Archimède** et enfin les **aérospatiaux** qui relèvent surtout de la **balistique**.

1) Les plus lourds que l'air ou Aérodynes.

• Les aérodynes non motorisés

- Modèles réduits ①
- Cerfs-volants ②
Formes et structures diverses
- Planeurs ultra légers (PUL)
Parachutes ③
Parapentes ④
Deltaplanes ⑤
- Planeurs ⑥



①



②



③



⑥



④



⑤

• Motorisés

- Modèles réduits ①
- A voilure fixe
Ultra légers motorisés ②
(ULM)
Avions ③
- A voilure tournante (giravions)
Autogires ④
Hélicoptères ⑤



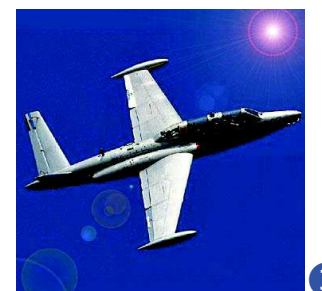
①



②



④



⑤

Hybrides ⑥



⑤



⑥

2) Les plus légers que l'air ou Aérostats.

• Ballons

- Captifs ① ou libres ③
- A air chaud ②
- A gaz (hélium) ③ *ici un ballon sonde météorologique*



①



②

• Dirigeables

- A structure souple
- A structure rigide ④
- Propulsés ⑤



④

⑤



③

3) Les aérospatiaux au comportement balistique.

- Modèles réduits microfusées ①
- Différents types de missiles ②



①



②



③

- Les objets destinés à l'espace :

Lanceurs / Fusées ③

Satellites ④

Navettes ⑤

Stations orbitales ⑥



④



⑤



⑥



1) Qu'est ce qu'un U.L.M. ?

L'Ultra Léger Motorisé (U.L.M.) est un aéronef ne pouvant emporter plus de 2 personnes et ayant une masse et une puissance limitée.

- 300 kg maximum pour les monoplaces - 450 kg pour les biplaces,
- puissance 45 kW maxi pour les monoplaces - 60 kW pour les biplaces,

Initialement conçus artisanalement, les U.L.M. ont beaucoup évolués. Fiables et sécurisés, les U.L.M. actuels bénéficie des techniques les plus sophistiquées. Leurs prix s'étalent de 3 000 € pour un paramoteur, à 60 000 € pour un 3 axes sophistiqués.



2) Les différents types d'ULM

Depuis 2012, il en existe six grandes familles:

- Le **pendulaire ①**,

Le "Pendulaire" c'est l'U.L.M. tout-terrain car adapté aux pistes courtes. Il est constitué d'un chariot est suspendu sous une aile delta. Il se pilote par déplacement du centre de gravité en agissant sur la barre de contrôle du trapèze. Vitesse de croisière, de 60 à 130 km/h.



- Le **multiaxe ②**,

Il se rapproche beaucoup d'un avion de tourisme par ses gouvernes et son équipement. Sa vitesse de croisière (de 60 à 250 km/h) et son confort lui permette le voyage.



- Le **paramoteur ③**,

Le paramoteur, apparu en 1980, est le plus petit aéronef autonome du monde et le moins cher. Le pilote est suspendu sous une aile de type "parapente" et propulsé par un moteur léger qu'il porte sur le dos. Le pilotage s'effectue par action sur les suspentes du parachute.



- **L'autogire ④**,

L'autogire, inventé par De la Cierva dès 1929, est le précurseur de l'hélicoptère. Classé U.L.M. en 1998, il se caractérise par une voilure tournante entraînée par le vent relatif. Son moteur n'actionne qu'une hélice propulsive. Il se pilote, comme un avion, par des gouvernes aérodynamiques et il est exceptionnellement maniable. Il peut voler lentement (25 km/h) mais aussi plus vite (130 km/h). Peu encombrant il est facile à transporter dans une remorque.



- **L'aérostat ultra-léger ⑤**.

L'aérostat ultra-léger comporte une enveloppe de sustentation et un système de propulsion qui le rend dirigeable.

La sustentation est assurée par une enveloppe contenant un gaz plus léger que l'air ambiant. Cela peut être un gaz inerte tel que l'hélium (type ballon), ou de l'air chauffé (montgolfière).



- **L'hélicoptère ultra-léger ⑥**.

L'arrêté modificatif créant la « Classe 6 dite hélicoptère ultraléger » a été publié le 29 Février 2012.

Un hélicoptère ultraléger répond aux conditions techniques suivantes :

- *monomoteur dont la puissance maximale est inférieure ou égale à 80 kW pour un monoplace et à 100 kW pour un biplace ;*
- *la masse maximale est inférieure ou égale à 300 kg pour un monoplace et à 450 kg pour un biplace. Ces masses peuvent être augmentées de 10 % dans le cas d'un ULM à flotteurs ;*
- *la charge rotorique à la masse maximale est comprise entre 8 et 20 kg au m².*



Le "Kompres" monoplace ULM



1) Qu'est ce qu'un parapente ?

L'invention de cette nouvelle discipline date de 1965. Son nom **slope soaring** signifie vol de pente.

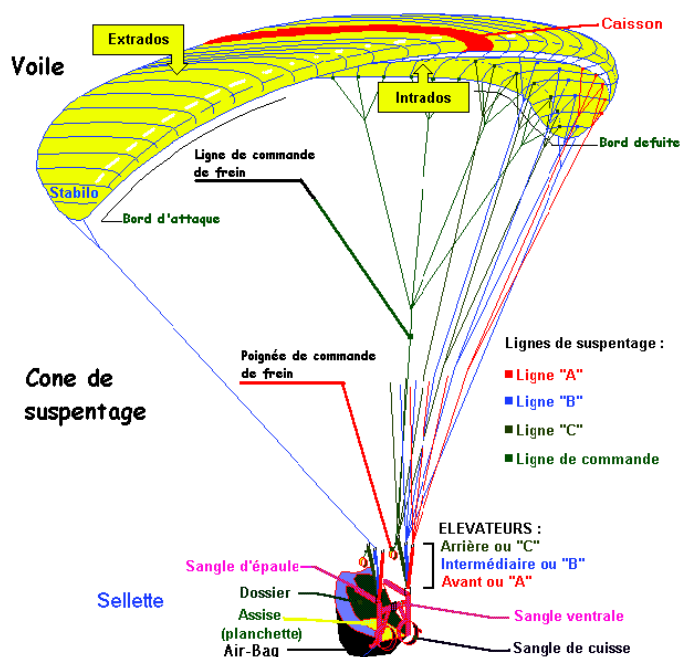
C'est un aéronef dérivé du parachute, permettant la pratique du vol libre. De nos jours, son utilisation, qui constitue un loisir et un sport, est indépendante du parachutisme et se rapproche plus d'autres sports aériens comme le vol à voile ou le (très proche) deltaplane.

La vitesse verticale de chute du parapentiste est d'environ 1 m/s... pour une vitesse horizontale de 7 à 10 m/s (pour les engins de compétition), Ce qui lui confère une finesse de 7 à 10.



2) Description et pilotage d'un parapente.

Un parapente est composé d'une aile, également appelée **voile**, à laquelle est reliée la **sellette** par des **suspentes** les **élévateurs**.



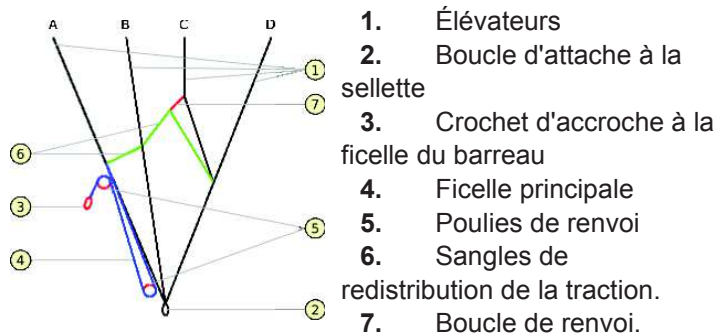
L'aile est fabriquée à partir d'un tissu résistant et léger. Elle est composée de "**caissons**" comportant des "**alvéoles**" dans lesquelles l'air s'engouffre afin de lui donner sa forme. L'aile est profilée comme une aile d'avion, ce qui génère la portance.

L'avant de l'aile, appelé le bord d'attaque, l'arrière est le bord de fuite.

La partie supérieure est appelée l'extrados et la partie inférieure l'intrados.

Le pilote dispose de deux **commandes** appelées **freins**, pour manœuvrer ainsi que d'un **accélérateur** utilisable aux pieds (accélérateur) ou à la main (trim).

Les suspentes sont colorées selon leurs emplacements sur l'aile, ce qui permet de connaître leurs rôles respectifs et facilite la manœuvres. On trouve les freins en rose, les avants en jaune simple, les deux séries de « B » (suspentes articulant le milieu de l'aile) en rouge et bleu, et les arrières en jaune fluo. Les freins (ou commandes) sont maintenant systématiquement mis à part, ainsi que les « A » (pour « avant »).



L'**accélérateur** est un dispositif constitué d'une barre actionnée par les pieds reliées aux élévateurs permettant de modifier l'incidence de l'aile. Cette modification d'incidence permet au parapente de gagner de la vitesse, mais elle rend l'aile plus sensible aux turbulences et dégrade sa finesse.

L'accélérateur permet un gain de vitesse de l'ordre de 10 à 15 km/h portant leur vitesse maximale aux alentours de 50 km/h (60 km/h en compétition).

Le **trim** en parapente fonctionne sur le principe du compensateur utilisé sur les avions. Il s'agit d'un dispositif permettant de modifier la longueur des élévateurs arrière afin de modifier le calage de l'aile. Difficile à utiliser (il faut lâcher les commandes) on ne le trouve plus que sur les parapentes biplace pour lesquels l'installation d'un accélérateur n'est pas toujours possible.

Un **parachute de secours** est intégré soit à la **sellette**, soit en poche ventrale.

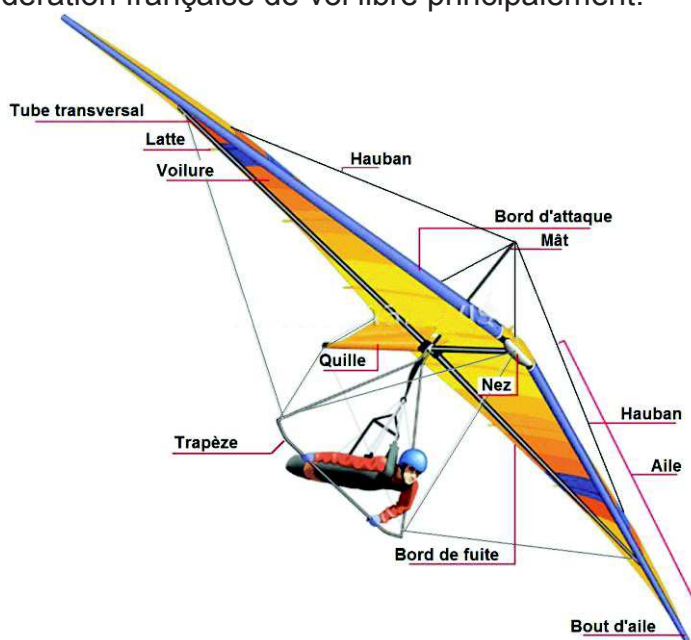
3) Le Deltaplane.

Le deltaplane ou aile delta est un aéronef de vol libre, à armature rigide. Sa pratique est un sport aérien encadrée, en France, par la Fédération française de vol libre principalement.

Le deltaplane est un appareil volant, adaptant l'**aile Rogallo** (*invention initialement destinée aux véhicules spatiaux*) au concept inventé dans les années 1890 par Otto Lilienthal.



Les premiers engins sont des assemblages de **tubes** et de **toile** rigidifié par un **mât** et des **haubans**.



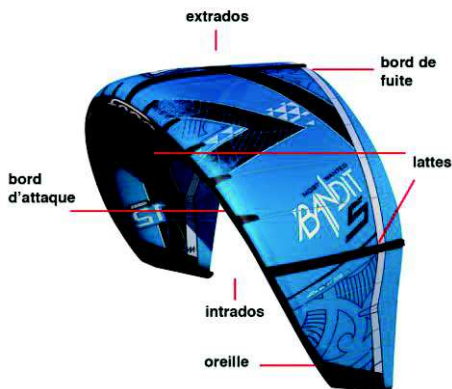
Afin de gagner en performance, les deltaplanes modernes sont équipés d'une aile à double surface, c'est-à-dire ayant, comme les ailes d'avions, un extrados et un intrados : des lattes, ou longerons, servent à conserver le profil de l'aile.

4) Le Kite surf

Le kitesurf (*anglicisme*) ou la planche volante (*fly-surf*) ou la planche aérotractée est un sport nautique de traction.

Il consiste à glisser sur une **planche** de surf de taille réduite en étant tracté par un cerf-volant (*kite en anglais*) appelé **aile**.

L'**aile** (ou **voile**) est pilotée par une **barre**, elle-même rattachée grâce à un **harnais** au **kitesurfeur**. Ce dernier oriente la barre à laquelle sont fixées quatre ou cinq **lignes** de 15 mètres à 30 mètres de long, de façon à assurer la traction et la direction de l'ensemble.



La barre permet le pilotage et en particulier le contrôle de la puissance de traction. Des dispositifs de sécurité (la cinquième ligne par exemple) permettent de limiter la puissance en cas de danger.

Grâce à la voile, les pratiquants de ce sport peuvent faire des sauts allant parfois jusqu'à 20 mètres au-dessus de l'eau. La surface de la voile se situe généralement entre 5 m² et 20 m².

Actuellement les kitesurfeurs utilisent plutôt des planches **bidirectionnelles**.

Elles sont munies **footstraps** issus des modèles de windsurf.

Le **harnais** (culotte ou ceinture) est un élément indispensable en kitesurf.

Les exigences de sécurité ont progressé à la suite de plusieurs accidents mortels, la France a décidé créer une norme pour le matériel.



Parmi les solutions retenues, citons :

- *la planche ne doit pas être reliée au surfeur par un leash,*
- *la possibilité d'annuler d'urgence la traction,*
- *la possibilité de détacher l'aile en dernière extrémité.*



Harnais ceinture



1) Composition d'un avion

Un avion comporte les éléments suivants :

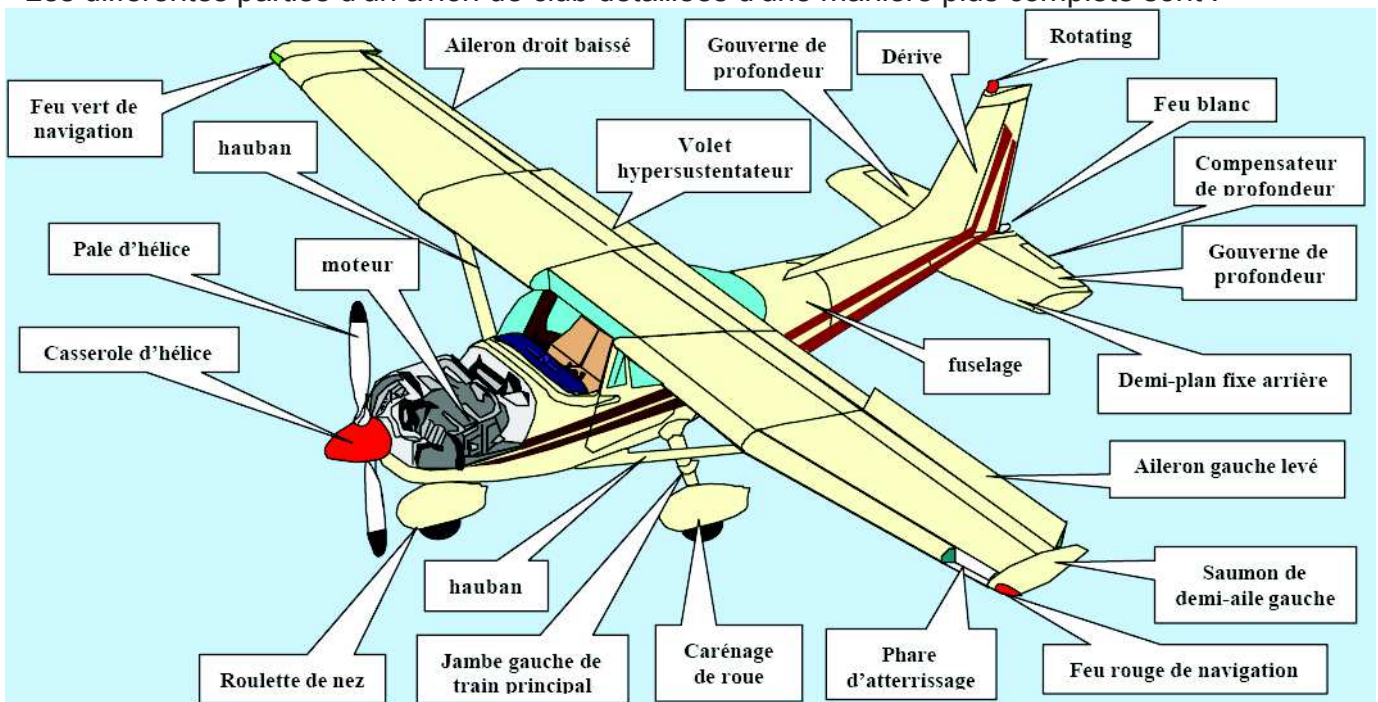
- les **ailes** (ou la *voilure*) assurant la sustentation ;
- le **fuselage** permettant de transporter la charge utile et de réunir les ailes aux organes de stabilisation et de manœuvre ;
- les **empennages** ou organes stabilisateurs ;
- les **gouvernes** ou organes de manœuvre ;
- le **train d'atterrissage** supportant l'avion au sol ;

L'ensemble des éléments précédemment cités constituant la **cellule** de l'avion. Par contre, les équipements de bord et le groupe motopropulseur, ne font pas partie de la cellule de l'avion.

- le **groupe motopropulseur** comprenant le moteur et l'hélice et assurant la propulsion de l'avion ;
- les **équipements de bord** comprenant les instruments et appareils de contrôle, les dispositifs permettant d'assurer la sécurité, le confort ...

2) Schéma détaillé

Les différentes parties d'un avion de club détaillées d'une manière plus complète sont :



Cet avion possède les caractéristiques spécifiques suivantes :

Monomoteur ; aile haute; droite; haubanée; train tricycle ; empennage cruciforme

3) Les ailes

Les **ailes**, dont l'ensemble constitue la **voilure**, subissent par suite de leur déplacement dans l'air une force de poussée verticale qui compense le poids de l'avion et permet à celui-ci de voler. Cette poussée (ou **sustentation**) est le secret du vol de l'avion.

Dans le langage courant, le mot aile est utilisé indifféremment pour désigner une seule aile ou la paire d'ailes de l'avion, se substituant alors au mot voilure.

La disposition des ailes a conduit à définir différents modèles d'avions :

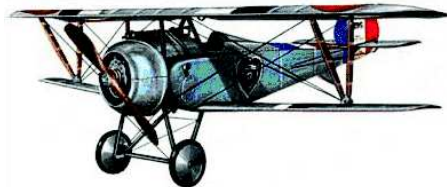
- Si un avion possède une paire d'ailes disposées de part et d'autre du fuselage c'est un **monoplan**,
- S'il dispose de deux paires d'ailes, il est appelé **biplan**.
- Il y a eu aussi des **triplans**...



Fokker E-III, monoplan ↑



Fokker DR – I Triplan ↑

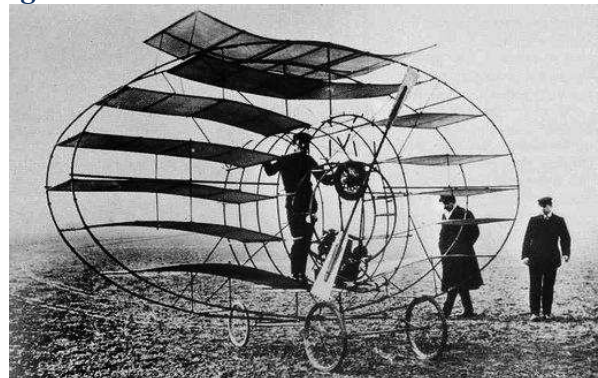


Chasseur biplan Nieuport 17 (1915). Ecusson personnel de Charles Nungesser. ↑

Et bien plus encore....
Comme le **multiplan** ci-contre !

Le multiplan du Marquis d'Ecqueville en 1908 ⇨

Beaucoup de configurations ont été explorées et les sont encore. Mais nous resterons dans les généralités qui permettent de définir la plupart des avions et non tous les prototypes les plus invraisemblables...



4) Constitution d'une aile "classique".

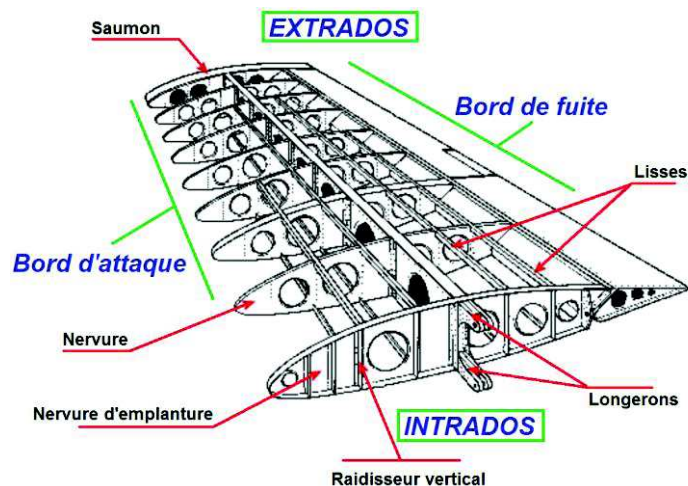
La rigidité de l'aile est assurée par un ou plusieurs **longerons** et des **nervures**.

Le revêtement de l'aile peut être en bois, en métal, en plastique ou en toile (*entoilage*).

L'extrémité de chaque aile se termine par une forme profilée appelée **saumon**.

La partie avant de l'aile s'appelle le **bord d'attaque**, la partie arrière s'appelle le **bord de fuite**.

La partie de l'aile qui assure la jonction avec le fuselage est l'**emplanture**.



Aile (structure interne) ↑



Karman (Aile) ↑

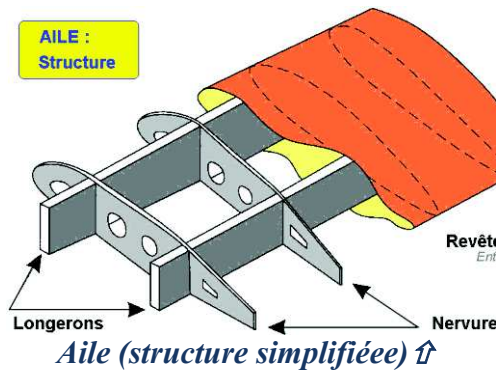
A ce niveau se trouve aussi le **karman** qui est une sorte de carénage optimisant l'écoulement de l'air à cet endroit.

Les **ailes** comportent des dispositifs mobiles tels que :

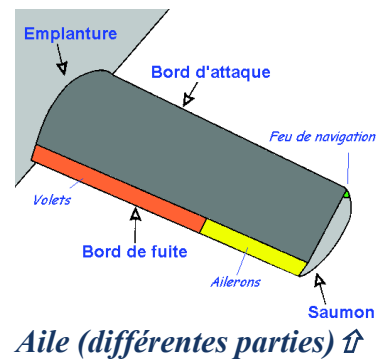
- Les **ailerons** ; ils sont situés à l'extrémité de l'aile. Ces deux surfaces se braquent en sens inverse, vers le haut ou vers le bas, permettant en vol d'incliner l'avion à gauche ou à droite (manche vers la gauche ou vers la droite).

- Les **volets hypersustentateurs** ; ils se trouvent le plus près du fuselage. Ils se braquent symétriquement, modifiant la forme de l'aile et permettant le vol à basse vitesse.

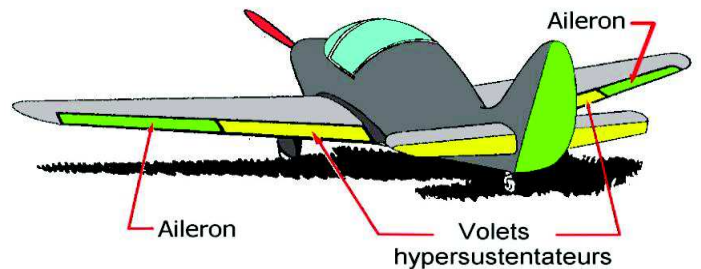
- Les freins aérodynamiques **spoilers** ou **aérofreins** ; on en trouve sur les planeurs et sur les avions de ligne.



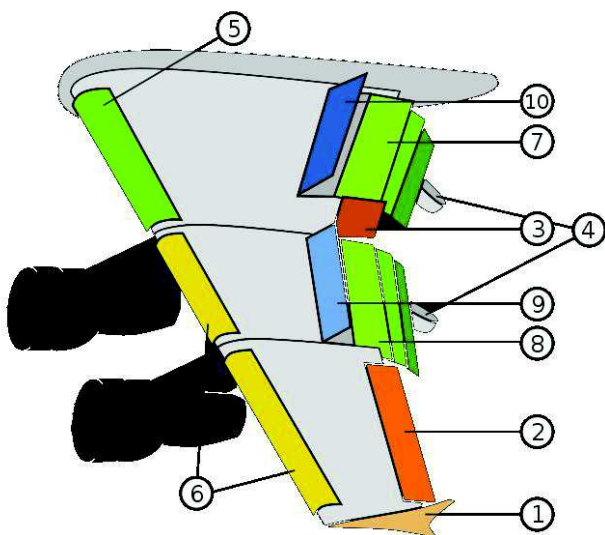
Aile (structure simplifiée) ↑



Aile (différentes parties) ↑



Avion (surfaces mobiles – gouvernes) ↑



Aile gros porteur (surfaces mobiles) ↑

Aile d'un avion de ligne : on retrouve les mêmes commandes de base complétées par des améliorations spécifiques (Spoilers Winglets)...)

1. Ailette verticale marginale : **Winglet** (en anglais)

2. **Aileron** basse vitesse

3. **Aileron** haute vitesse

4. Rail de glissement des volets

5. **Becs de bord d'attaque** de type

Krüger

6. **Becs de bord d'attaque** de type **slats**

7. **Volets intérieurs** de type **Fowler**

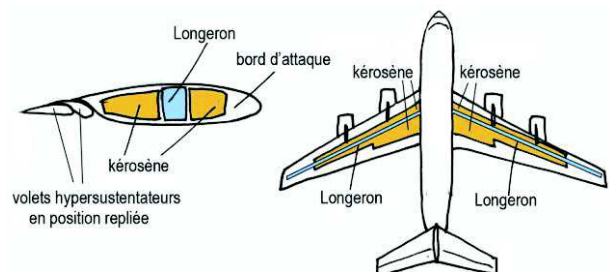
8. **Volets extérieurs** de type **Fowler**

9. **Spoilers** (destructeur de portance)

10. **Spoilers / aérofreins**

Pour être complet sur les ailes il est bon de préciser que très souvent, et aussi bien pour les avions de club, les avions commerciaux petits ou gros porteurs, et les avions militaires y compris les chasseurs :

- les **réservoirs de carburant** sont logés dans l'épaisseur des ailes.



Aile et emplacements des réservoirs ↑

5) Géométrie et comportement aérodynamique de l'aile

La géométrie d'une aile se définit en fonction de plusieurs éléments:

- L'**envergure** : par définition la distance entre les deux extrémités de l'aile.

L'envergure ⇨



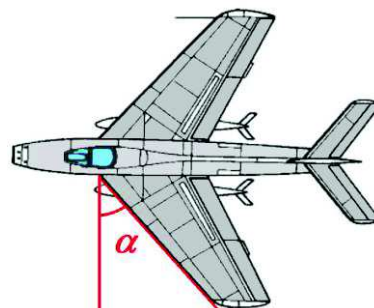
- **La surface alaire** (ou surface d'aile) est la surface totale de la voilure, y compris celle qui traverse le fuselage.

Surface alaire ⇨



- **Flèche** : angle formé par la perpendiculaire de l'axe longitudinal de l'avion et le bord d'attaque de l'aile; elle peut être positive, négative ou neutre. (définition BIA).

Flèche définition simple pour le BIA ⇨



Flèche définition complète pour le CAEA ⇨

- **Flèche** (définition plus précise : CAEA) : C'est l'angle horizontal formé entre le lieu du quart avant des cordes et l'axe transversal de l'avion.



- L'**allongement** ; en aérodynamique, l'allongement λ d'une aile se calcule en divisant le carré de l'envergure par la surface des ailes. $\lambda = \frac{L^2}{S}$. Plus simplement c'est aussi le rapport de l'envergure par la longueur de la corde moyenne : $\lambda = \frac{L}{C}$ même si la corde moyenne est parfois difficile à définir (Spitfire Concorde...).

• La **finesse** d'un avion est définie comme le rapport entre la portance et la traînée. C'est aussi le rapport de la vitesse horizontale sur la vitesse de chute (V/V_z). C'est aussi le rapport entre la distance parcourue et la perte d'altitude. La finesse maximale ne dépend pas du poids mais du coefficient de portance et donc de l'incidence de l'aile. La vitesse de finesse maximale augmente avec le poids pour un même avion.

Comparaison finesse / allongement.

- La finesse d'une aile augmente avec son allongement. Les planeurs ont des voilures à fort allongement (de 20 à 25) et des finesse max de 50 à 60, les avions classiques de 6 à 12 pour une



finesse de 20 et les avions rapides à faible allongement (de 3 à 5) ont une finesse de 10 environ.

- Le **Dièdre** : c'est l'angle formé par le plan des ailes et le plan horizontal; il peut être positif (comme sur ce DR 400 d'aéroclub), nul (chasseurs et avions d'acrobatie) ou négatif (certains chasseurs ou gros porteurs).

Dièdre ⇒



Calage de l'aile ⇒

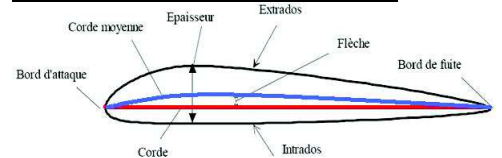
- **Angle de calage** : c'est l'angle entre la corde du profil d'emplanture et l'axe longitudinal de référence du fuselage, généralement horizontal à la vitesse de croisière. *En vol de croisière stabilisé, l'angle de calage est égal à l'angle d'incidence.*



- **Profil de l'aile** : contour géométrique obtenu par une section verticale de l'aile (perpendiculaire à l'envergure).

Description du profil

⇒



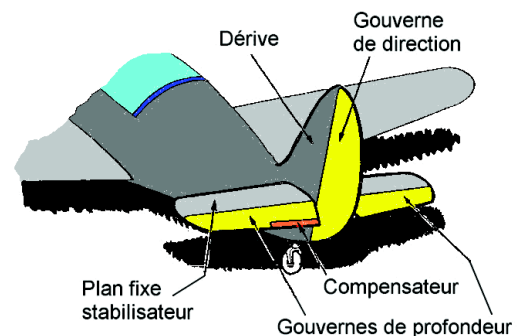
- **Corde de référence** : segment qui joint bord d'attaque au bord de fuite
- **Profondeur** : longueur de la corde de référence
- **Ligne (ou corde) moyenne** : ligne à égale distance de l'extrados et intrados.
- **L'épaisseur** maximale se situe vers le tiers avant. Mais l'indication intéressante est l'épaisseur relative. C'est le rapport entre l'épaisseur maximale du profil (ép ou t en anglais) à sa profondeur ou corde ©.
- **Épaisseur relative** = $\text{ép}/c$ ou t/c
Les notions sur les profils seront développées dans le cours d'aérodynamique.

6) Les empennages

Ils sont constitués par un ensemble de plans horizontaux et verticaux comportant des parties fixes et des parties mobiles.

En général, ils se situent dans la partie arrière de l'avion... pour les formules les plus classiques.

Empennage ⇒



• L'empennage horizontal comprend :

- Le **plan fixe stabilisateur** destiné à assurer la stabilité longitudinale de l'avion.
- La **gouverne de profondeur** (articulée sur le plan fixe stabilisateur) qui permet au pilote de manœuvrer l'avion en profondeur (manche en avant ou en arrière).

Sur certains avions, l'empennage horizontal est constitué par une seule surface entière mobile. Il s'agit dans ce cas d'un empennage monobloc.

• L'empennage vertical comprend :

- Une surface fixe nommée **dérive**, destinée à assurer la stabilité de route de l'avion.
- Une **gouverne de direction** (articulée sur la dérive) permettant au pilote de manœuvrer l'avion en direction grâce aux palonniers.

Les empennages sont en général cruciformes. Il est possible de rencontrer des avions équipés d'empennages en T au en V.

C 27 J Spartan ⇒



- Empennage **cruciforme** (classique) :

- Empennage **en T** : la gouverne de profondeur est placée à l'extrémité supérieure de la dérive.

C 17 Globemaster ⇒



- Empennage **en V** : Les surfaces inclinées à 45°/verticale assurent l'ensemble des fonctions des gouvernes de direction et de profondeur.

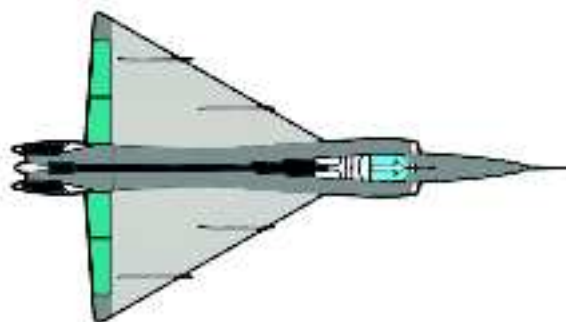
Fouga Magister ⇒



• Les élévon ! Empennage ou aile ???

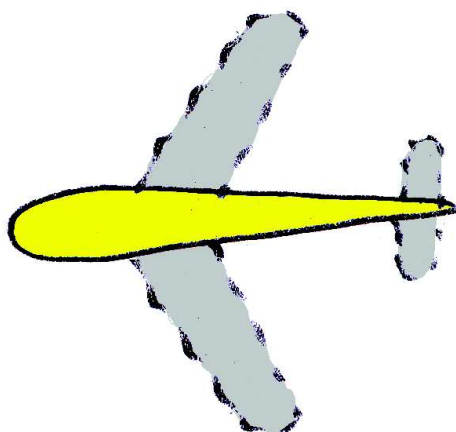
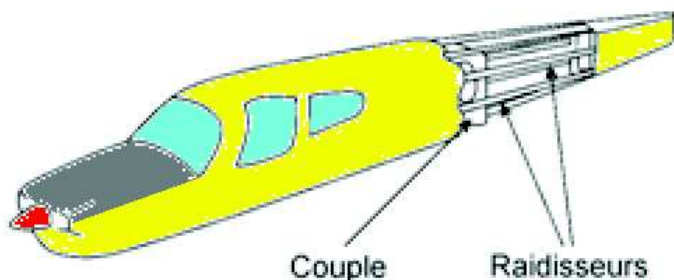
Certains avion sont dépourvus d'empennage mais ils nécessitent des gouvernes... Ces pièces mobiles qui peuvent jouer à la fois le rôle de gouverne de profondeur et celui d'aileron sont appelées **élévon** (Le terme est dérivé de l'anglais *elevon*, contraction de *elevator* (gouverne de profondeur) et *aileron*).

Elevons d'un Mirage III ⇒



7) Le fuselage

Son rôle essentiel est de réunir la voilure aux organes de manœuvre constitués par les empennages.

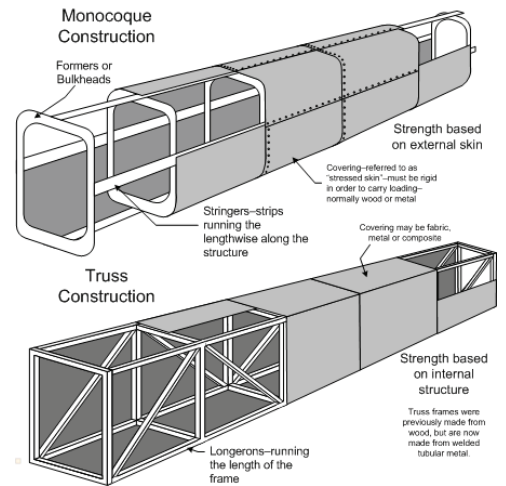


Il est généralement conçu pour être habitable et recevoir la charge utile, les équipements ainsi que le groupe motopropulseur.

Sa rigidité est assurée par des **couples** et des **raidisseurs**.

Ci contre une construction monocoque (en haut), pour laquelle le revêtement est dit travaillant puisqu'il supporte une partie des contraintes... et une structure treillis (en bas) avec revêtement "non travaillant".

Plus loin, un chapitre entier destiné aux CAEA fait un point beaucoup plus complet sur le fuselage...



8) Le train d'atterrissage

Il permet le roulage, le freinage et le contrôle de l'appareil au sol.

A l'atterrissage, il encaisse le choc de la prise de contact avec le sol.

En vol, il présente une traînée aérodynamique plus ou moins nuisible, éventuellement réduite par un carénage de roues sur atterrisseurs fixes ou supprimée sur atterrisseurs escamotables (c-à-d à train rentrant : il est alors constitué par des demi-trains qui viennent s'encaster sous les ailes ou sous le fuselage après le décollage de l'avion). *Remarque : il y a déplacement du centre de gravité lors de la rentrée du train.*

Sur ces deux types de trains, les freins sont montés sur les roues de l'atterrisseur principal.

Des amortisseurs (oléopneumatiques, mécaniques ou à lames) absorbent les efforts et les chocs liés au roulage et à l'atterrissage.

- Le train d'atterrissage classique

Simple et robuste, il se compose d'un **train principal** et d'une **roulette de queue**. Ses deux roues principales sont placées en avant du centre de gravité de l'avion. A l'arrière, l'avion repose sur une seule petite roue orientable, ou parfois sur une simple béquille. Dans ces conditions, le fuselage de l'avion n'est pas horizontal mais incliné vers le bas à l'arrière. L'avion présente un angle de garde d'environ 20° qui évite la « mise en pylône ».



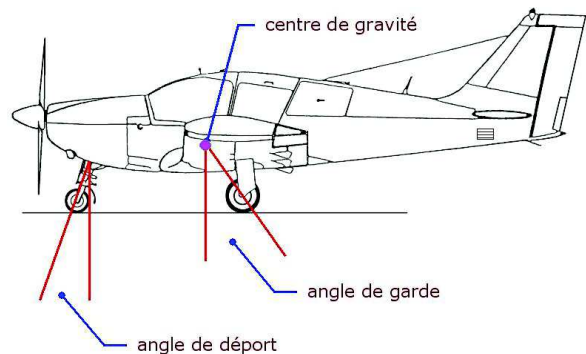
Train classique ↑

- Le train d'atterrissage tricycle

Il comporte un **atterrisseur principal** et une **roulette de nez**.

L'**angle de garde** d'environ 15° évite le basculement de la queue.

L'**angle de déport** évite la casse de la roulette de nez lors d'une rencontre avec un obstacle au roulage.



Les angles intéressants le train d'atterrissage ↑

Plus coûteux et plus lourd que le train classique, roulette de nez fragile, le train tricycle est cependant plus répandu que le premier en raison de ses avantages :



Train tricycle ↑

- Au roulage, l'avion repose en ligne de vol, c'est à dire avec un fuselage horizontal. Le pilote a une meilleure visibilité et la conduite est aisée.
- L'avion est plus stable et est moins sensible au vent de travers,
- Il a une bonne tenue au freinage,
- Le couple de l'hélice a une plus faible incidence.

• Les groupements de roues (diabolo, boggies)

Pour les avions plus lourds le train principal comporte des roues plus nombreuses fixées sur des boggies.

Boggies à 6 et 4 roues ⇒

Groupées par deux cela s'appelle un "diabolo".

L'ensemble comporte un système de freinage (multidisque pour les avions modernes)

*Diabolo et boggies sur Concorde ⇒
et freins à disques ⇒*



• Le train d'atterrissage monoroue... éventuellement avec "balancines".

Pour les aéronefs légers le **mono roue** ou le **monoroue** est rare... c'est surtout le cas des planeurs et planeurs.



Pour des avions plus lourds (Le "Vautour, Sea Harrier ou pire le B 52 !) l'extrémité des ailes est assortie de "**Balancines**" qui permettent d'assurer la stabilité horizontale à très basse vitesse ou à l'arrêt.



Balancines du "Harrier"



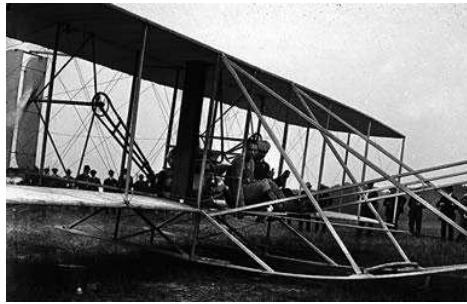
Du "Vautour" ↑ et du B52 ⇒



- Les trains d'atterrissages particuliers !

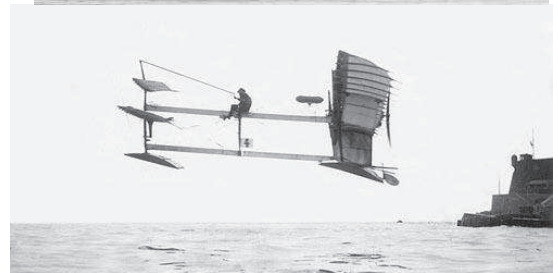
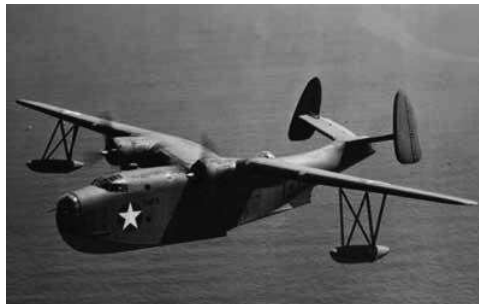
Des **patins** :

Wright Flyer et X15 ⇨



Des **flotteurs**
sur le

*premier hydravion
d'Henri Fabre
et
sur ce Martin PBM-5S
Mariner* ⇨



Des **skis** :

C 130 et Yak 52 ⇨



9) Le groupe motopropulseur (GMP)

Le **groupe motopropulseur** comprend un moteur à combustion interne, entraînant une hélice ainsi que les accessoires indispensables.

Il est fixé à la **cellule** de l'avion par le **bâti-moteur**, et isolé de la **cabine** par une **cloison pare-feu**.

La puissance des moteurs varie considérablement d'un avion à l'autre (de 50 cv à 2500 cv).

Quand l'avion est doté d'un seul moteur, donc un monomoteur, celui-ci est généralement disposé dans la partie avant du fuselage. Cependant il peut se trouver à l'arrière du poste de pilotage, c'est le cas notamment des avions qui ont leurs empennages réunis à l'aile par des poutres.



Monomoteur en position traction. Dewoitine 520



MD-81 UHB Demonstrator propfan (propulseurs)

Si l'avion comporte deux moteurs (bimoteurs) ou plus, ceux-ci sont logés dans les fuselages moteurs installés dans les ailes... même si des solutions originales existent (*Cessna 337 Push Pull; Boomerang de Burt Rutan; Dornier*).



Bimoteur. P38 lightning (St Exupéry)



Trimoteur. Ju 52



Quadrimoteur. B 24 "Libérateur"



Octomoteur ! Le B 52.



Cessna 337 "Push Pull"



*"Boomerang" un avion asymétrique
(une idée de Burt Rutan)*

L'hélice a généralement deux pales comparables à de petites ailes.

Lorsque la puissance du moteur le permet on peut utiliser des tripales, quadripales... ou plus afin de faire passer la puissance sans trop augmenter le diamètre de l'hélice (des problèmes miées aux vitesses supersoniques en bout de pale peuvent apparaître en cas de trop grand diamètre).

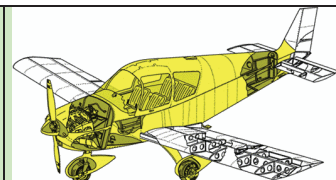
Par leur rotation, ces pales repoussent l'air vers l'arrière donnant naissance à une force de traction qui permet à l'avion de se mouvoir dans l'air.

Notez le soin apporté aux capots moteurs et aux écoulements d'air.

Entrée d'air moteur, casserole d'hélice, sortie d'échappement et ouïes de refroidissement.



Les capots moteurs et la casserole de l'hélice concourent à assurer l'écoulement de l'air et le refroidissement du moteur.



Texte et illustrations intégralement prélevé sur internet. Le pillage concerne, encore une fois, le site de : <http://www.lavionnaire.fr/> Mais il est tellement bien fait sur certaines parties qu'il n'y a quasiment RIEN à retoucher...

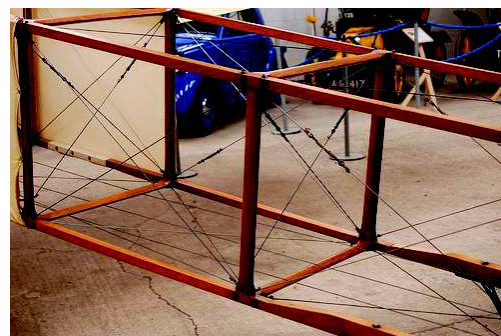
Conçu au début pour supporter le poids du moteur et du pilote, relier les ailes et l'empennage, le fuselage a beaucoup évolué au fil des ans. D'abord aérodynamiquement il s'est fuselé d'où son nom, ensuite ses dimensions ont augmenté aussi bien en diamètre qu'en longueur pour transporter des passagers ou du fret. Aujourd'hui il peut contenir plusieurs centaines de passagers et leurs bagages.

1) Les différents types de construction

- La structure en treillis

La **structure en treillis** est constituée de poutres reliées par des traversants horizontaux, verticaux et diagonaux et souvent raidis par des cordes à piano (Voir ci-dessous fuselage des premiers avions).

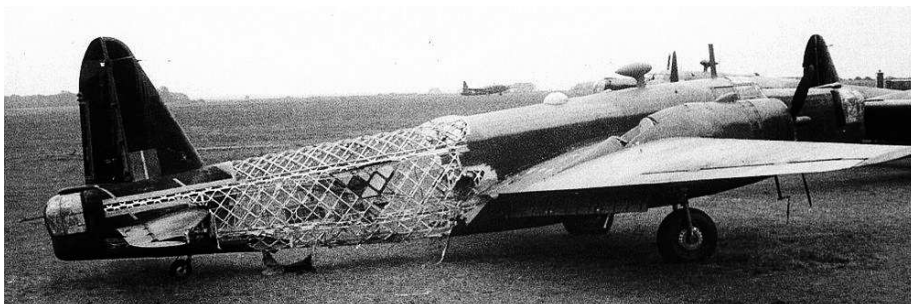
Ci contre un fuselage de Blériot XI avec ses raidisseurs tendus.



- La structure géodésique

La **structure géodésique** consistait à assembler des lattes de bois en diagonales croisées, ou des cornières en aluminium croisées en diagonale et rivetées entre elles. Ce type de structure n'est plus employé actuellement.

Ci contre un Wellington laisse entrevoir sa structure géodésique.



- La structure monocoque

La **structure monocoque** est faite de **coquilles** assemblées entre elles. Cette technique pouvant utiliser des moules se prête bien à l'utilisation des **fibres synthétiques**. La plupart des planeurs actuels et quelques ULM utilisent ce mode de procédé pour leur fuselage et même certains pour leur ailes.

- La structure semi-monocoque

La structure **semi-monocoque** est actuellement la plus utilisée (Voir ci-dessous Fuselage d'un avion de transport).

2) Les efforts appliqués au fuselage

Comme pour les ailes le fuselage subit aussi des **efforts** et des **contraintes**.

On peut considérer que le **fuselage** est constitué de deux parties. Une partie avant qui va du cône de nez au **caisson central** et une partie arrière qui va du caisson central au **cône de queue**. Sous l'effet du poids, il se crée des efforts de **flexion**, la partie supérieure est étirée alors que la partie inférieure est compressée.

Le braquage des gouvernes de profondeur ou de direction crée également des efforts sur le fuselage.

Lorsque l'avion est **pressurisé**, la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur de l'appareil engendre des contraintes sur le revêtement du fuselage.

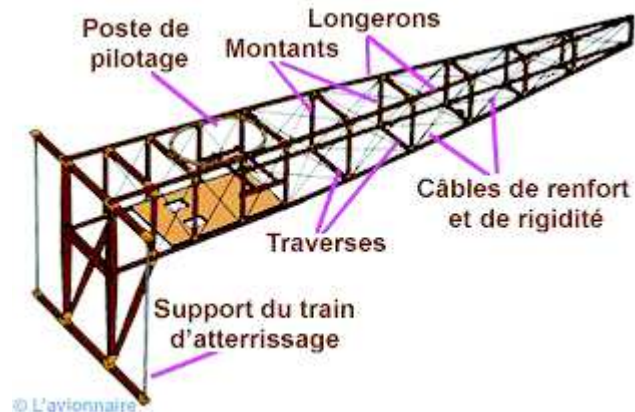
Si les réacteurs sont accrochés à l'arrière du fuselage, la partie amont aux réacteurs sera **comprimée** alors que la partie arrière sera **tirée** dû à la traînée de l'empennage.

3) Fuselage des premiers avions

Ci-contre le fuselage de ce **Blériot** est composé de quatre **longerons** en frêne reliés par des **montants** et **traverses**. Le tout est assemblé par des **étriers métalliques** en forme de U.

L'ensemble est ensuite raidi par des **cordes à piano tendues**. De façon à diminuer au maximum le poids, l'intérieur du poste de pilotage est en **rotin**.

Le support du train d'atterrissage est robuste afin de pouvoir encaisser le choc d'un contact brutal avec le sol. Seul l'avant du fuselage est **entoilé**.

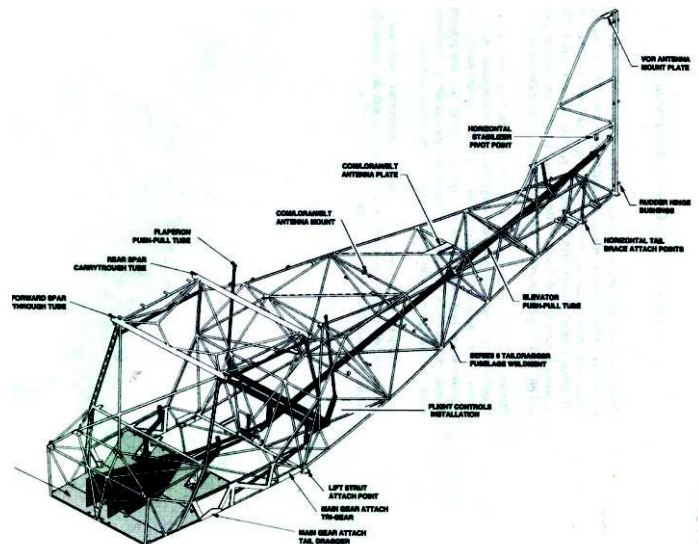


Source: Wikimedia Commons/ Photo: W olivier

Vue arrière du Blériot XI.

Plus tard lors des progrès en connaissance aérodynamique les fuselages seront entièrement entoilés et profilés.

On trouve encore cette structure sur des avions de loisir légers (ULM) ci-contre.

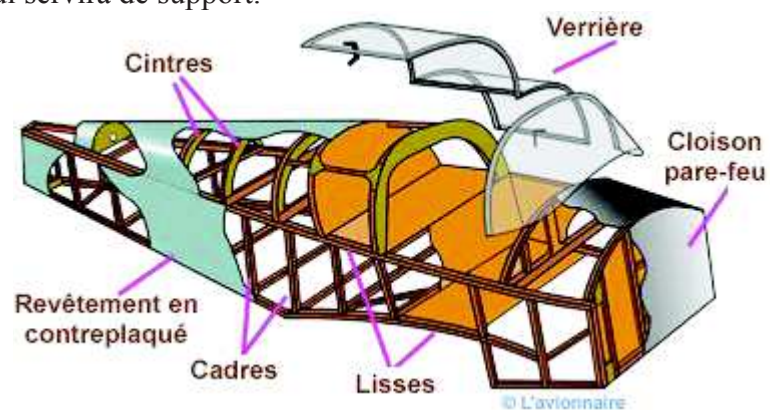


- **Fuselage en bois**

Comme pour les ailes c'est un **Jodel** qui servira de support.

L'ossature de ce fuselage est composée de lisses, de **cadres** et de **cintres supérieurs** collés entre eux. Un **revêtement intégral** en contreplaqué également collé assure la **rigidité** de l'ensemble. Le tout est **marouflé** en **dacron** puis peint.

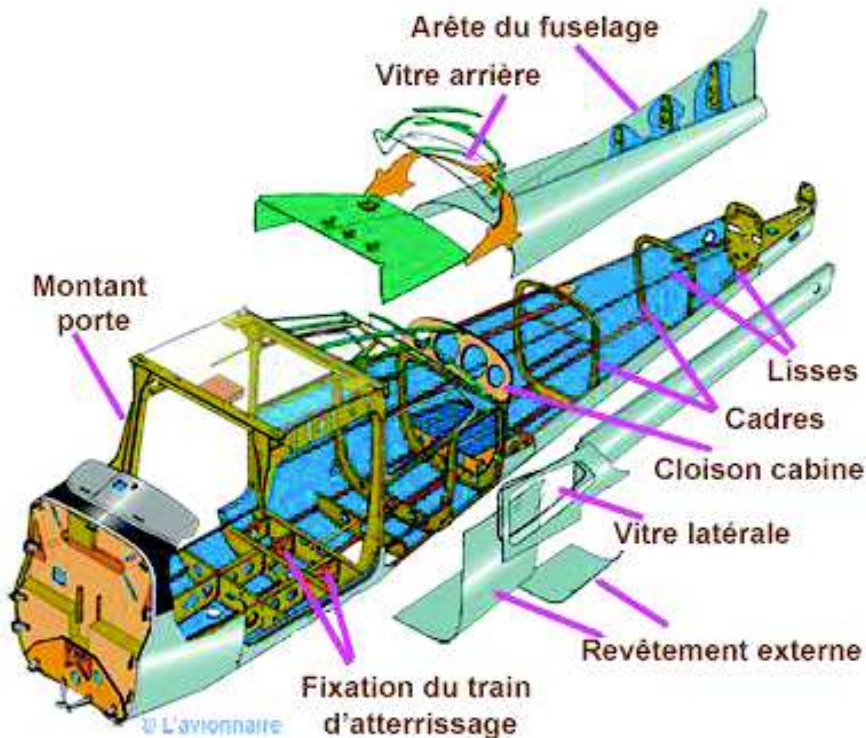
La **verrière** en forme de papillon est composée de plexiglass rivé sur des tubes d'aluminium. Fixée au centre, elle pivote de chaque côté vers le haut.



- **Fuselage métallique d'un avion léger**

Cette fois c'est un **Cessna 172** qui servira de support à ce paragraphe.

Le **fuselage** est de **type semi-monocoque** constitué de **cloisons verticales** et de **cadres** reliés par des **lisses** qui courent de l'avant à l'arrière du fuselage. Les montants des portes sont renforcés. La fixation du train d'atterrissage se trouve à l'avant du chambranle arrière de la porte. Elle est formée de quatre pièces forgées d'aluminium.



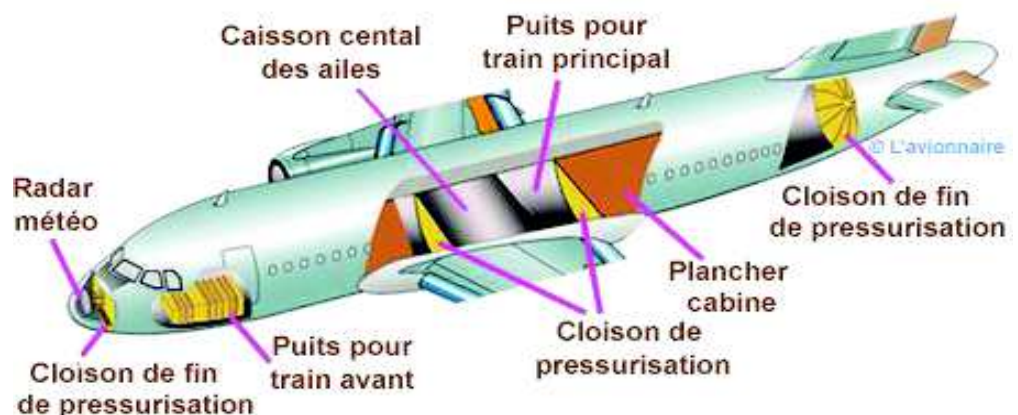
Le revêtement en tôle d'aluminium est riveté ce qui permet d'étaler les contraintes sur toute la structure.

A noter que le revêtement est plus épais au-dessus et dessous du fuselage que sur les côtés.

• Fuselage d'un avion de transport

La **structure semi-monocoque** est la méthode la plus utilisée pour les avions de transport.

Le fuselage est constitué :

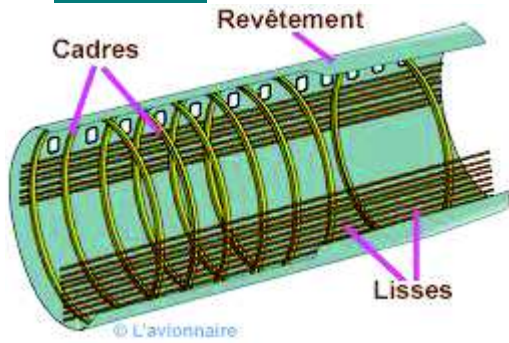


- de cadres ou couples, pièces rondes ou ovoïdes
- de lisses profilés longitudinaux perpendiculaires aux cadres.
- du revêtement ou peau fixé sur les lisses et les cadres.
- de cloisons de fin de pressurisation
- d'un ou de plusieurs planchers.
-

Les avions de transport étant **climatisés** et **pressurisés**, l'air sortant des climatiseurs arrive en cabine, traverse le plancher, entre dans les soutes puis s'évacue par des vannes de décharge (outflow valves).

La pression étant la même en cabine qu'en soute le plancher est donc sollicité uniquement par la charge de marchandise (sièges, poids des passagers ou fret). Par contre les parties du plancher au-dessus des puits du train d'atterrissage et du caisson central de voilure doit être renforcées pour contenir les charges dues à la pressurisation.

- **Les cadres**



Ils donnent la forme du fuselage - ronds pour les Airbus (300 à 340) et ovoïdes pour le Boeing 747 et l'Airbus 380.

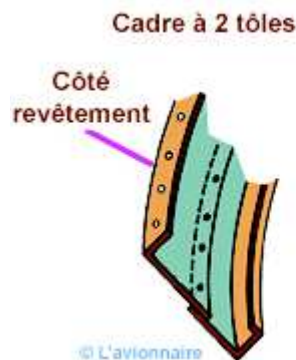
- **Les cadres forts**

On les trouve dans les endroits où les efforts sont importants notamment aux jonctions du fuselage avec les ailes et de l'empennage, au train d'atterrissage, aux cloisons de fin de pressurisation ainsi qu'au niveau des réacteurs si ceux-ci sont accrochés au fuselage.

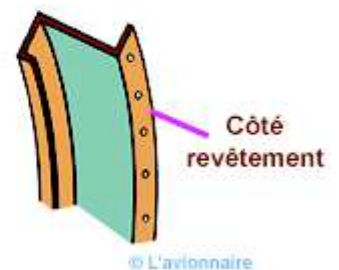
- **Les cadres courants**

Espacés régulièrement le long du fuselage, ils jouent un rôle crucial pour la structure de l'avion en intégrant les efforts dus à la pressurisation encaissés par le revêtement.

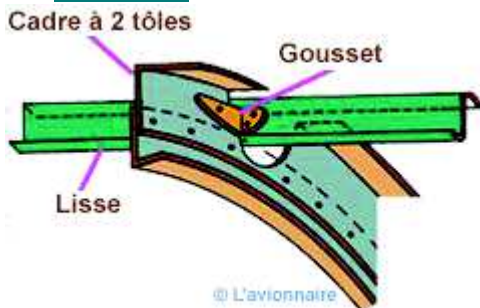
Les **cadres** courants sont constitués d'une ou de deux tôles pliées et rivetées entre elles.



Cadre à 1 tôle



- **Les lisses**



Elles sont constituées de différents tronçons reliés entre eux afin d'en assurer la continuité de l'avant à l'arrière de l'avion. Elles aident le revêtement dans l'absorption des contraintes longitudinales de traction et compression.

Les **lisses** passent à travers les cadres par des emplacements appropriés. Elles sont néanmoins reliées aux cadres par des goussets.

Ci-contre l'arrière d'un fuselage d'Airbus. On aperçoit nettement les lisses passant à "travers" les cadres, l'encadrement de la porte arrière ainsi que la paroi (en gris) de fin de la zone pressurisée.

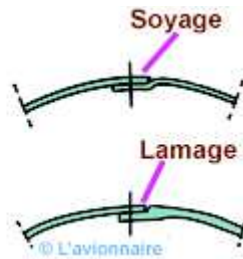
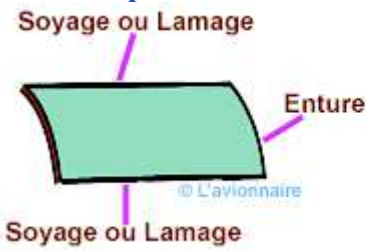


Source: Wikimedia Commons/ Photo : SOVXX

• **Le revêtement**

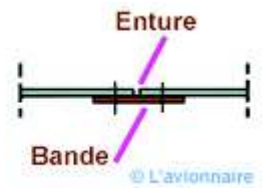
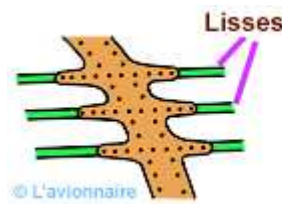
Il a été longtemps composé uniquement d'un alliage aluminium- cuivre, aujourd'hui certaines parties sont réalisées en matériaux composites, afin d'en diminuer le poids.

Comme pour l'extrados ou l'intrados le revêtement du fuselage encaisse une partie des **contraintes de traction-compression**, ainsi que les **contraintes de cisaillement**. Il absorbe également les **charges dues à la pressurisation**.



Les côtés rectilignes se reprennent soit par **soyage** (pli en forme d'escalier qui permet l'assemblage de deux tôles sans toucher à son épaisseur) soit par **lamage** (usinage pour aplanir une surface).

Pour les autres côtés une plaque intérieure de jonction est utilisée. Cette plaque ou bande peut servir également à reprendre les **lisses**.

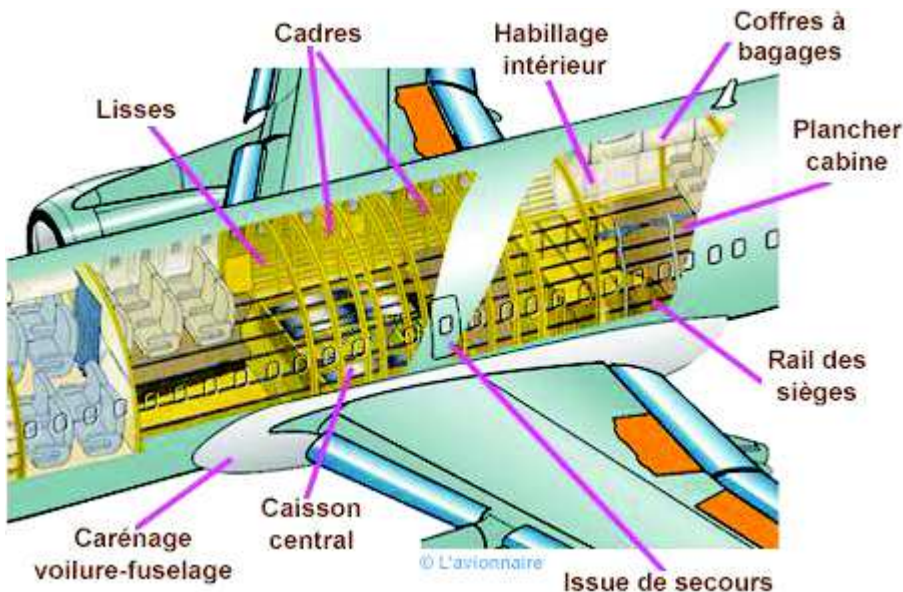
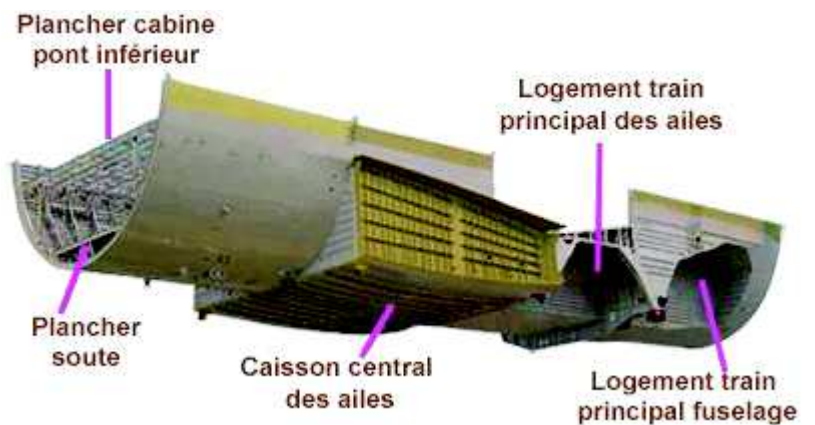


La fixation revêtement lisses se fait par **rivets** ou par **collage** (Airbus). En supprimant les rivets, le collage permet un gain de poids non négligeable.

• **Le caisson central**

Le **caisson central** de voilure réalise la jonction des deux ailes avec le fuselage et peut également servir de réservoir carburant.

Ci-contre le caisson central de l'**Airbus 380** pèse 11 tonnes. Il est conçu en CFRP (fibre de carbone renforcé plastique) 4,5 tonnes et structure métallique 6,5 tonnes.



Fuselage Airbus 319

L'intérieur de la cabine provient d'un dessin d'André Bréand paru dans Air & Cosmos en 1996.



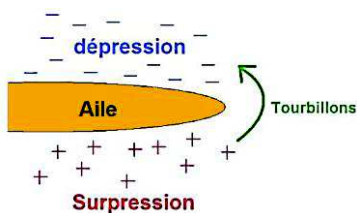
1) Existence du tourbillon marginal (ou tourbillon de Prandtl)

• Quel est le problème ?

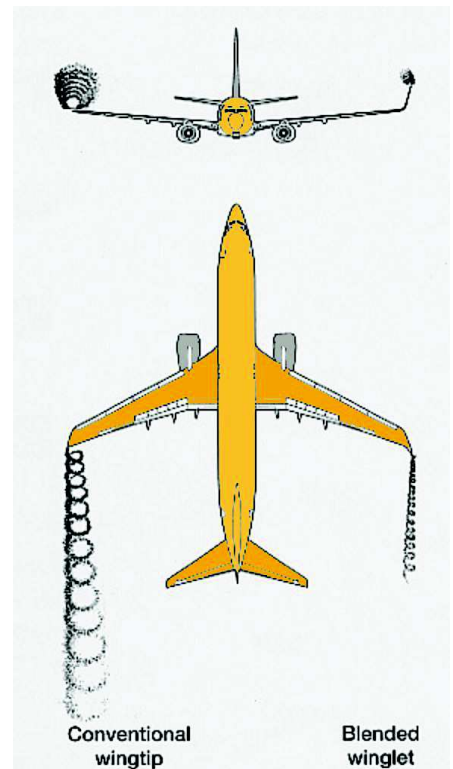
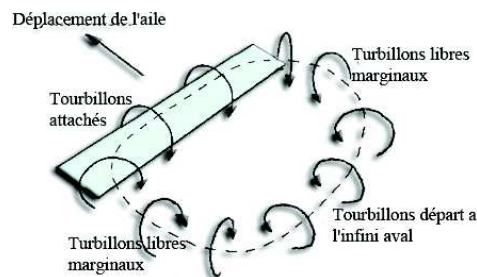
L'extrémité des ailes d'un avion (ou même d'une pale d'hélice !) est le siège d'un **tourbillon aérodynamique**.

Il est dû à une différence de pression entre les deux faces soumises à un flux d'air : l'intrados et l'extrados.

L'intrados est le siège d'une surpression alors que c'est une dépression qui apparaît sur l'extrados.



En bout d'aile ou de pale il apparaît un écoulement de contournement des hautes pressions vers les basses pressions ... donc de l'intrados vers l'extrados.



Ce mouvement de rotation, entraîné par le vent relatif prend la forme d'une spirale.

En outre, la mise en place de cette turbulence nécessite de l'énergie et donc l'existence de force... avec

pour conséquences l'existence d'une traînée induite...

Ce tourbillon est appelé **tourbillon de Prandtl**, ou **tourbillon marginal**.

Ce tourbillon pose donc clairement deux problèmes :

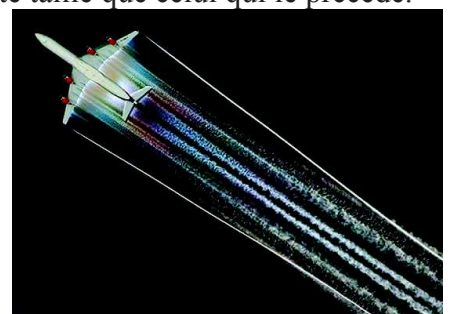
- Combien coûte-t-il ? Pour l'avion qui le crée...
- A-t-il d'autres conséquences... pour un autre aéronef qui le rencontrerait ?

• Notion de turbulence de sillage

Le tourbillon marginal fait partie intégrante de la **turbulence de sillage**.

Ce phénomène est très dangereux lorsqu'un avion pénètre la turbulence laissée par un avion qui le précède. La situation s'aggrave encore si le second est de bien plus petite taille que celui qui le précède.

Sur cet avion évoluant à haute altitude on remarque différentes traînées de condensations. Celle, très irisée par de fines particules de glace, correspondant aux rejets de vapeur d'eau issues des moteurs... mais aussi les deux traces en bout d'ailes correspondant aux condensations liées aux variations de pressions responsables des tourbillons marginaux.



D'autres exemples avec la trace tourbillonnante dans un nuage



- **Les conséquences sur l'avion**

Le **tourbillon marginal** est réduit si les ailes sont a fort allongement... (*avions de ligne ou planeurs*).

La présence de **winglets** réduit encore cette **turbulence de sillage**.

Mais bien entendu le tourbillon reste proportionnel à la taille de l'avion qui le crée.

2) **Les avancées techniques visant à réduire le tourbillon de Prandtl**

http://www.lfsd.edu.do/10_11/TPE%202011/TPE%20Aviation%20site%20web%20-%20Copia/avancee.html

- **Les winglets**

L'économie de carburant est LA chose LA plus importante pour un grand constructeur aéronautique. Cette économie va, en plus de son aspect financier direct, permettre d'augmenter la charge payante ou le rayon d'action.

C'est d'ailleurs le choix effectué par Airbus avec son A 320 néo...

Comment y parvenir ?

Si on excepte les progrès sur les motorisations... le second moyen consiste à réduire la traînée induite...

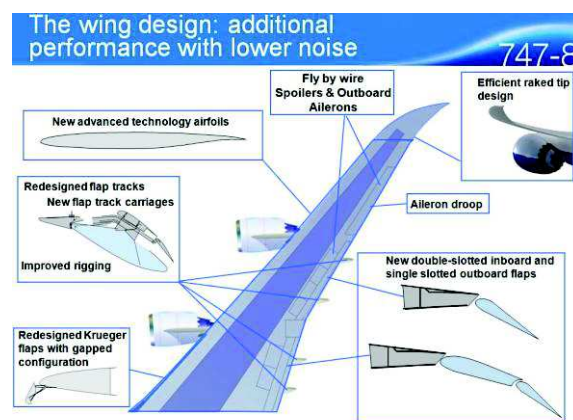
Créés pour cela et utilisés depuis 1974, les **winglets** sont actuellement utilisées sur la plupart des avions de ligne.

Ce sont des ailettes, plus ou moins verticales, placée à l'extrémité de la voilure, qui augmentent l'allongement effectif en récupérant une partie de l'énergie du tourbillon marginal, en réduisant le flux de pression qui passe de l'intrados à l'extrados

Information sujette à discussion...

Un winglet recevant un flux d'air oblique peut redresser ce flux et développer une portance latérale légèrement dirigée vers l'avant, ce qui peut annuler sa traînée propre. Le gain d'efficacité est de l'ordre de quelques pour cent (2 à 3%) et varie avec l'incidence (l'efficacité sera nulle ou même négative à forte vitesse).

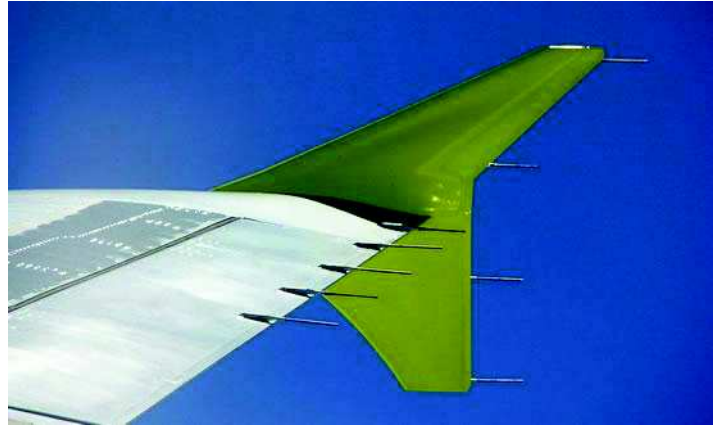
Pour d'évidentes questions de gros sous et de brevets Boeing et Airbus utilisent des dispositifs ayant des formes très différentes :



Notez, schéma du 747-8 à l'appui, que la recherche porte en fait sur toutes les parties de l'avion et a pour but aussi de diminuer le bruit en complément de l'augmentation des performances.



Winglet du type Boeing (Blended Winglet)



Winglet du type Airbus (Fence Winglet)

3) Les winglets du futur ?

La technologie aéronautique évolue aussi coté winglets. Les avions de nouvelle génération (ou les reliftings d'anciens modèles) Boeing 777 & 787 le Boeing 747-8, Airbus A350 ...



utilisent de nouveaux types de winglets appelés **raked winglet**, **sharklet winglet** et **non-planar winglet**.

- Les raked Winglets

Les **raked winglet** sont utilisés sur les avions Boeing. (B767-400ER, B777-300ER/-200LR, B747-8, B787, B737NG). Ils ont une forme pointue et courbée, et sont légèrement relevés vers l'arrière.

Les **raked winglets** ont une double utilité: Ils augmentent la surface de l'aile et jouent le rôle de winglets, ce qui explique sa forme allongée et remontée vers l'arrière. Si la surface de l'aile est augmentée, il y a alors plus de portance qui se génère sur les ailes, et donc moins de traînée (en grande partie la traînée induite) . Cela réduit la distance de décollage de l'avion, permet à l'avion de monter plus rapidement sans avoir une grande incidence, et donc avoir une consommation en carburant moins importante.

Le B787 consomme 20% moins de carburant que les avions long-courrier actuels) . Il réduit aussi la formation du tourbillon marginal, et son gain d'efficacité est de 5,5 %. C'est une avancée intéressante comparée à celle de 2~3% de moyenne des winglets normaux.

De plus, 0,3m d'allongement en raked winglets sur chaque aile équivaut à 0,9m de blended winglets sur chaque aile. Ainsi les raked winglets peuvent avoir une efficacité plus grande que les winglets normaux tout en étant plus courts que les ceux-ci.



- Les Sharklet (ou Sharked winglets)

Les **Sharklets**, ou **Sharked winglets**, sont des winglets en forme d'aileron de requin qui ont été créés par Airbus, pour sa famille d'Airbus A320. Ce sont en fait des sortes de blended winglets plus longs et pointus à leur extrémité , avec une forme arrondie entre le sharklet et l'aile.



Les sharklets ont été principalement mis au point pour réduire la consommation en carburant de leur famille d'A320 qui était équipés de fence winglets. Le principe est le même que pour les winglets normaux, sauf qu'en ayant une pointe plus fine, le bout de l'aile va générer un tourbillon plus petit et fin, comme les blended winglets. Ceci est la preuve que la traînée est réduite, et donc que la portance est augmentée. Les sharklets permettront aux A320, A321, A318 et A319 de consommer 15% de carburant en moins.

- **Non-Planar winglet**

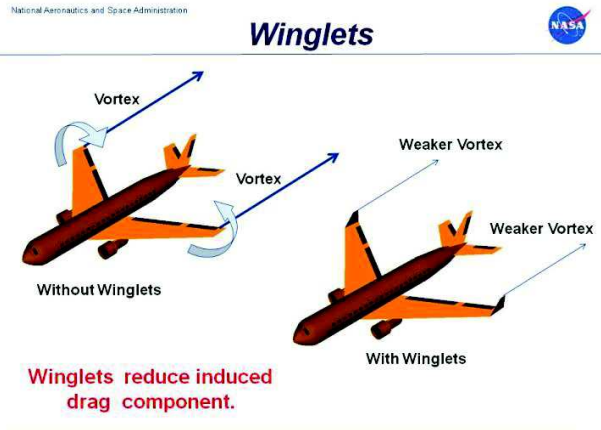
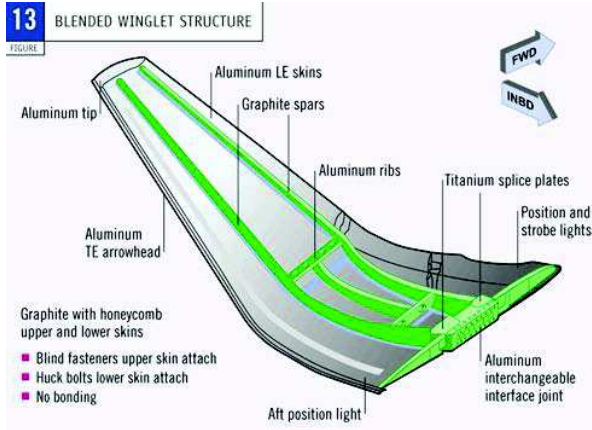
Les **non-planar winglets** sont une combinaison de sharklet et de blended winglet, inventés par Airbus pour leur futur A350XWB (XWB pour eXtra Wide Body). Les ailes sont prolongées vers l'arrière comme sur les B787, puis sont relevées en pointe comme sur les A320 utilisant des sharklets.

Cette forme arrondie et pointue permet donc de gagner de la surface alaire et d'augmenter la portance, diminuant ainsi la traînée, comme avec les sharklets et les blended winglets. La formation du tourbillon marginal est donc réduite et la turbulence de sillage est moins forte. Ce type de winglet devrait permettre à l'A350XWB (qui devrait faire son premier vol l'an prochain) de consommer 25% de moins que les avions long-courrier d'aujourd'hui, et de réduire la formation du tourbillon marginal d'environ 5~6%, à peu près comme les blended winglets.



Bien sûr, tout cela permet aussi à l'avion d'aller un peu plus vite et un peu plus loin. Les techniques se ressemblent beaucoup, le design change un peu suivant les constructeurs et leurs appareils. Notons que le design des ces nouveautés donne un air très moderne aux avions, ce qui devrait logiquement rassurer les passagers. (*Cela est devenu très important aussi chez les constructeurs aéronautiques*). Ces avancées sont donc des réussites: elles réduisent le tourbillon marginal en augmentant la portance et donnent une très belle silhouette à ces oiseaux géants!

Illustrations complémentaires



4) Les winglets ne produisent-ils pas eux-même une force de poussée ?

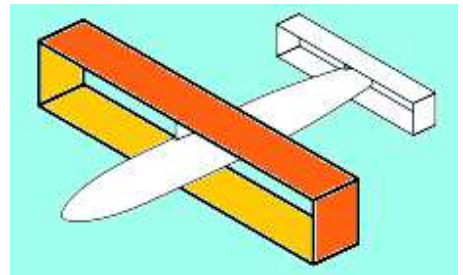
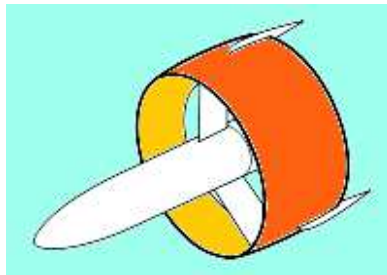
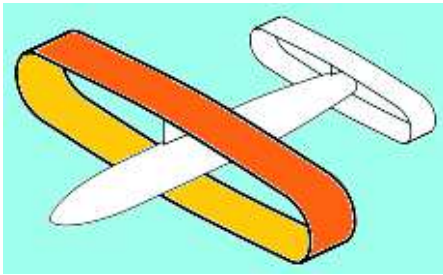
Ça peut paraître bizarre comme idée, mais certains soutiennent cette thèse : les tourbillons à l'extrémité de l'aile viendraient "frapper" le winglet sur sa partie externe ce qui créerait une force de poussée, un peu comme le vent sur la voile d'un bateau qui tire des bords. Cette théorie semble assez douteuse.

5) L'aile infinie, l'aile de demain?

Il n'y a pas que les winglets pour minimiser la formation du tourbillon marginal. L'**aile infinie** en est un autre exemple.

- L'aile théoriquement infinie...

Une **aile en anneau** ou une **aile infinie** est une aile d'avion non plane, de forme circulaire ou annulaire qui englobe le fuselage de l'appareil. C'est la forme la plus aboutie pour réduire les effets du tourbillon marginal. L'intérêt de l'aile circulaire est qu'elle présente une traînée aérodynamique réduite par rapport à une configuration classique de performance comparable. Mais la circulation de l'air étant homogène sur toute la voilure, cela occasionne une instabilité en tangage. Et du simple point de vue mécanique, la configuration en aile circulaire est fragile.



L'aile étant infinie, la suppression qui se forme à l'Intrados ne peut pas passer par dessus l'aile pour rejoindre la dépression qui se trouve à l'Extrados. Les deux parties se mélangent instantanément avant de se transformer en traînée infime dû au vent relatif de l'avion. C'est pour cela que le tourbillon est très réduit dans ce type d'aile. De plus, la forme de l'aile «classique» étant mise en place de manière circulaire, l'aile devient un type d'aile biplan, et créer donc une double portance. Et donc, il y a beaucoup moins de traînée et cette aile pourrait donc beaucoup réduire la consommation de carburant d'un avion.

- L'aile infinie dans l'histoire...

L'aile circulaire a première vue, semble être une technologie de la toute dernière génération. Mais détrompez-vous, cette avancée date de bien longtemps.

La première mise en œuvre de l'aile en anneau est le **Blériot III** construit en 1906 par Louis Blériot et Gabriel Voisin, soit 3 ans après le premier vol de l'homme ! (*Comme quoi les premières pensées pour améliorer le vol sont les plus logiques !*) La voilure consistait en deux ailes annulaires et en tandem (*avion à aile biplan*).



Comme beaucoup de chercheurs en aéronautique, la **NASA** étudie actuellement l'aile infinie en soufflerie, mais ils se heurtent à des difficultés technologiques et financières, qui n'ont pas permis à ce concept de voir encore le jour...

On ne sait donc pas à combien de pourcent l'aile infinie pourrait réduire le tourbillon marginal.



- **Spiroid winglets**

Il existe cependant un appareil qui a utilisé cette forme circulaire comme winglet, le **Falcon 50** en 2001 pour de simples tests pour voir l'efficacité de ce type de winglet que les constructeurs ont nommé « **spiroid winglets** ».

Ce test a été une très grande réussite à l'époque car ces winglets ont permis de réduire la formation du tourbillon de 6~10% et la consommation de carburant de 22~25% ! A un moment, certains ingénieurs de Boeing ont voulu tester ces spiroid winglets sur leur B777.

Mais pour une raison inconnue, cela n'a pas été fait. Probablement pour une raison d'esthétique et par peur d'effrayer les passagers par ses formes d'ailes ?

On peut ainsi imaginer comment seront les ailes ou winglets de plus tard, qui réduiront beaucoup plus le tourbillon marginal et donc réduiront le danger de la turbulence de sillage. Des avions avec des winglets de toutes sortes? Des avions avec de grosses ailes infinies ?



6) Les fences

A part les winglets et la solution extrême l'**aile infinie** on a trouvé d'autres solutions pour minimiser la formation du tourbillon marginal. Ces dispositifs s'attaquent à l'écoulement de contournement des hautes pressions vers les basses pressions qui existe sur l'aile de l'intrados vers l'extrados.

- **Les fences**



Les "**fences**" ou cloisons sont des pièces ajoutées sur les ailes dans le but de séparer l'écoulement d'air entre les volets et les ailerons pour les ailes en flèche.

↔ Ici les fences sur un Mig 17

Cela permet de mieux contrôler l'avion aux grands angles en lisse.

En fait on tente de redresser l'écoulement parallèlement à la vitesse pour alimenter les ailerons afin de conserver le contrôle en roulis.

L'objectif est le guidage de la trajectoire des filets d'air sur les voilures en flèche. Habituellement (sans fence) l'air est dévié vers l'extrémité de l'aile, et une des conséquences de cette déviation est que le décrochage de l'écoulement se fait d'abord à l'extrémité de l'aile.

A ce moment l'extrémité de l'aile n'est donc plus "portante", la portance se déplace vers l'avant (le centre de portance avance sur la flèche) et l'avion a tendance à cabrer spontanément (autocabrage) et peut même devenir instable. Si cela arrive pendant un décrochage ou à une incidence proche de l'incidence de décrochage, cela aggrave la situation car il faudrait au contraire faire piquer l'avion.

7) La portance tourbillonnaire

- **Les générateurs de vortex**

Ce sont des petits générateurs de tourbillons locaux qui réintroduisent de la vitesse dans la couche limite ralentie. Ils sont utilisés généralement pour augmenter l'efficacité des surfaces de contrôle aux grands angles (en amont des ailerons, sur les côtés de la dérive, sous les stabilisateurs d'empennages en T, sur les plans canards de faibles dimensions). Ils sont également montés sur les ailes de certains chasseurs et avions de ligne.

Les **générateurs de vortex** sont petites languettes qui ont une fonction aérodynamique.

Avant l'ère des calculateurs on a installé ces dispositifs pour résoudre des problèmes aérodynamiques (*turbulence, efficacité des gouvernes, comportement bizarres des ailes...*) sur différents prototypes. Il était rare de les conserver sur l'avion final.

Lorsqu'ils sont conservés c'est pour améliorer le comportement aux basses vitesses en jouant sur la couche limite. La plupart du temps la traînée n'est pas augmentée.

Dans cette situation, le rôle principal de ces appendices aérodynamiques est d'abaisser la vitesse de décrochage de l'avion. Ainsi, dans le cas du vol de croisière à faible angle d'incidence, les filets d'air restent collés à l'extrados et tourbillonnent imperceptiblement mais ne se décolle pratiquement plus au niveau du bord de fuite. La portance est sensiblement la même que lorsque l'aile n'est pas équipée de générateurs de vortex.

Par contre, si l'angle d'incidence augmente de façon importante, les filets d'air restent collés à l'extrados jusqu'au bord de fuite et la portance n'est pas détruite. Le décrochage de l'aile est alors retardé.

Le A4D ci-contre est un exemple de leur utilisation pour résoudre des problèmes d'aérodynamique. Un vaste programme d'essais et d'erreurs a donné lieu à un modèle intermédiaire de générateurs de tourbillons utilisés sur le A4D-1 et une autre sur la A4D-2 et suivants Skyhawks.



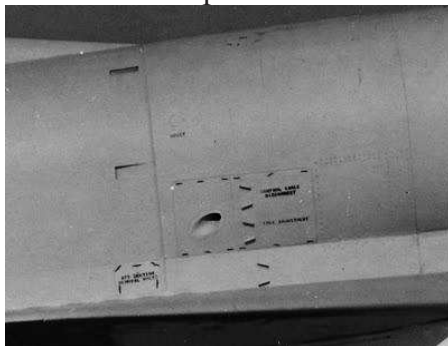
Générateurs de vortex sur un ULM



A4D-1 Vortex Generators

Voici ci-contre, l'exemple d'un modèle qui a été évaluée et non adoptée :

Dans certain cas ces générateurs de vortex ne sont pas sur les surfaces portantes... ils peuvent même être non parallèles à l'écoulement de l'air.



Générateurs de vortex non parallèles sur le fuselage d'un A4D-1.

Trois séries de générateurs de vortex sur l'extrados de ce Gloster Javelin



En conclusion, lorsqu'ils sont conservés, les générateurs de vortex appliqués sur le bord d'attaque d'une aile permettent d'en améliorer les performances, notamment à basse vitesse. La gamme de vitesse est amplifiée vers le bas (vitesse de décrochage inférieure, vitesse maxi inchangée). La sécurité est augmentée, les phases critiques du décollage et atterrissage sont facilitées.

• Les séparations

Le rôle des "fences" est donc d'empêcher les filets d'air de la couche limite d'être déviés vers l'extérieur de l'aile.

Séparation bien visible sur le milieu du bord d'attaque de ce Mirage III (au niveau du bidon) ⇨





Les **séparations** sur les avions de combat (*Mirage III ci-dessus par exemple*) ont le même objectif : l'air qui passe par cette fente et qui s'écoule le long de l'aile joue le rôle de fence.

Il est aussi probable qu'une portance tourbillonnaire soit aussi générée aux grands angles.

"Séparation" ou Décrochement sur une aile d'avion construction amateur. (Lancair ???)

- **Bec DLE (Drooped Leading Edge)**

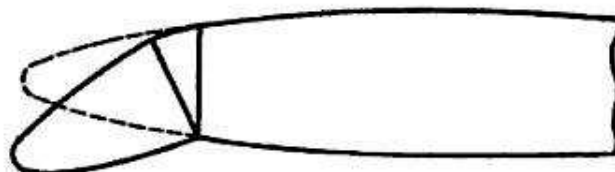
Les bords de type DLE (Drooped Leading Edge) constituent une cassure locale et d'une modification du bord d'attaque générant un tourbillon aux grands angles.



A drooped leading edge cuff installed on an American Aviation AA-1 Yankee as part of a NASA experiment

Ce tourbillon s'ajoute au tourbillon marginal (du bout d'aile) pour aspirer la couche limite à l'extrados.

Cela renforce la portance du bout de l'aile en permettant de plus grandes incidences sans perdre le contrôle latéral, problème numéro un du décrochage. On rencontre ce système sur quelques avions légers et sur certains chasseurs à aile en flèche.



(a) DROOPED LEADING EDGE

8) L'apex... un dispositif pour les basses vitesses !

Sur les avions modernes, l'angle de flèche est parfois réduit afin d'améliorer les performances à basse vitesse ; de ce fait, l'incidence de décrochage est diminuée.

Afin d'améliorer la portance à forte incidence et accroître ainsi le domaine de vol, certains appareils voient l'emplanture de leurs ailes prolongées par des surfaces fixes nommées **Apex**.

À forte incidence, ces surfaces génèrent de puissants tourbillons qui, en atteignant l'aile, créent une force de portance dite **portance tourbillonnaire**.

Ici l'extension d'aile vers l'avant (Apex) d'un F 18 Hornet ⇒



- **Equivalent apex : flèche variable et gothique**

La configuration en aile delta à flèche variable, obtenue par des apex (extensions de bord d'attaque à très forte flèche) ou par une forme en plan en ogive (Concorde), permet d'obtenir un supplément de portance tourbillonnaire d'environ 15 à 20 % par rapport à la portance de l'aile delta triangulaire.

Exemples : Navette spatiale, Saab Drakken, Concorde...



Navette spatiale



SAAB Drakken



Concorde



1) Introduction

Trois instruments utilisent des gyroscopes.

- Le **conservateur de cap**. (Direction de l'avion).
- L'**horizon artificiel**. (assiette de l'avion).
- L'**indicateur de virage**.



2) Principe de fonctionnement d'un gyroscope.

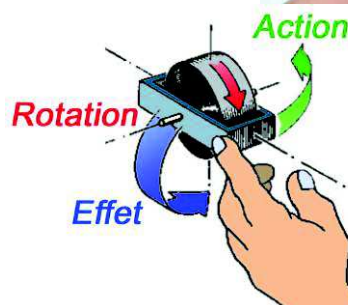
Un gyroscope est constitué d'un volant d'inertie monté dans un cadre articulé.

Première propriété : Le gyroscope, tournant à vitesse élevée ($12\ 000\ \text{t}\cdot\text{min}^{-1}$), **conserve la même orientation dans l'espace**, un peu comme une boussole garde la direction du Nord.

Deuxième propriété : Si l'on tente de faire tourner un gyroscope autour d'un axe perpendiculaire à son axe de rotation, celui-ci réagit avec un couple s'exerçant de manière à faire basculer l'axe initial de rotation de manière à faire tourner le gyroscope dans le sens de l'action appliquée...



La toupie est un bon exemple de gyroscope lorsqu'elle tourne encore à vitesse élevée... ce qui n'est pas le cas lorsqu'elle commence, comme ici, à s'incliner.



Tandis que le gyroscope conserve une position stable (fixe ?) par rapport à la Terre, c'est le boîtier de l'instrument, solidaire du tableau de bord, se déplace avec l'avion selon deux axes.



Attention !!! Le pilote, lié à l'avion, a, lui, l'impression que c'est le gyroscope qui change de direction !



L'alimentation du gyroscope pour **entretenir sa rotation** est une nécessité.

On peut la réaliser soit par **dépression** (pompe à vide entraînée par le moteur) soit **électriquement**.



1) Présentation du l'horizon artificiel

C'est un instrument important de votre tableau de bord.

En effet, il permet simultanément de maintenir une **assiette** et de mesurer une **inclinaison**. Il n'indique pas le taux de virage.

C'est un instrument gyroscopique qui nous restitue la position de l'horizon naturel lorsque celui ci n'est pas visible. Il est indispensable pour le vol de nuit et/ou dans les nuages (VSV).

Il est constitué d'une sphère ou d'un cylindre rendu fixe dans l'espace par la toupie d'un gyroscope et d'un **symbole** (maquette) :



fixe (mais repositionnable), lui, par rapport à l'avion.



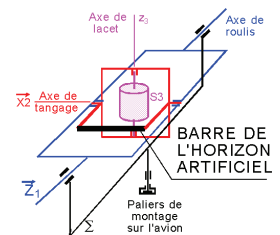
Le symbole (maquette) se déplace devant un tambour (ou une sphère) sur lequel figure une représentation de l'horizon naturel, de la terre (en **sombre**) et du ciel (en **bleu**).

Le tambour gradué en degré permet de déterminer l'**assiette**.

La couronne supérieure porte, de part et d'autre du repère origine, trois repères principaux à 30, 60 et 90° permettant de mesurer l'**inclinaison**.

Tout mouvement de l'avion autour de ses axes de roulis et tangage se traduira sur l'horizon artificiel par un déplacement du tambour (ou de la sphère) par rapport au symbole représentant l'avion.

Les pilotes disposent donc d'informations chiffrées sur l'**assiette longitudinale** ainsi que sur l'**inclinaison** de l'avion par simple lecture de l'horizon artificiel.



Assiette nulle
Inclinaison à droite



Assiette à cabrer
Inclinaison nulle



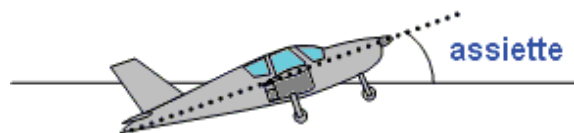
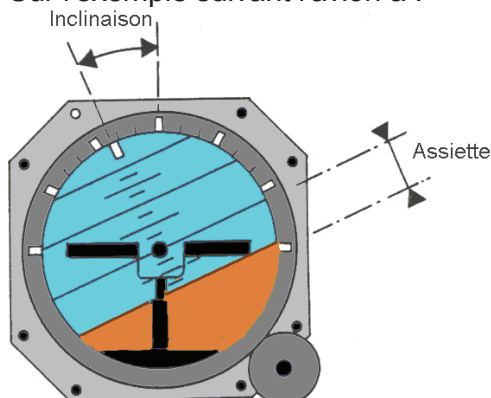
Assiette nulle
Inclinaison à gauche



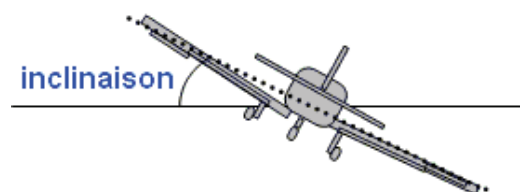
Assiette à piquer
Inclinaison nulle

• Un exemple :

Sur l'exemple suivant l'avion a :



- une **assiette à cabrer** (10° environ) et...



- est **incliné vers la droite** (25° environ)



1) Le conservateur de cap ou directionnel ou gyrocompas.

Il présente l'avantage de conserver une référence de cap choisie par le pilote, quelle que soit la phase du vol de l'avion (montée, descente, variation de vitesse, virage, etc.).

Le directionnel est en effet un gyroscope à axe de référence asservi à l'horizontale. Le rotor tourne à vitesse élevée (de l'ordre de 10 000 t/mn), or nous savons que la propriété fondamentale d'un gyroscope est de garder une position fixe par rapport à l'espace.

Il est asservi à une vanne de flux qui permet de le recalibrer automatiquement en fonction du champ magnétique terrestre.

Si le pilote choisit de caler son conservateur de cap sur le nord magnétique, son directionnel lui fournira donc en permanence une indication stable de son cap magnétique.

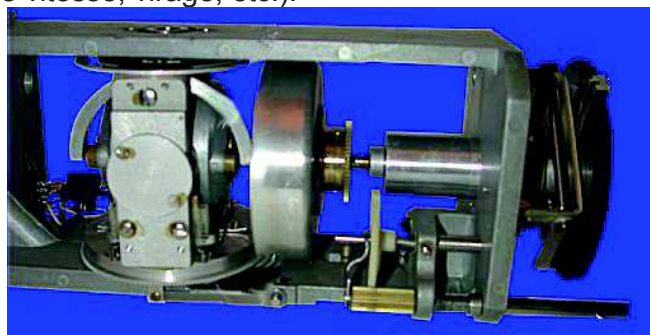
Bien sur, cet instrument ne dispense pas du compas de navigation qui servira de référence pour caler et recalibrer le directionnel.

- Particularité d'utilisation

L'indication fournie par le directionnel est, comme pour tous les gyroscopes altérée par les frottements et par la précession qu'il est impossible d'éviter dans la conception d'un gyroscope.

Au bout d'un certain temps, ce décalage devient trop important pour rester négligeable.

Il faut alors le **recaler manuellement**, pendant une **phase de vol stable**, sur les indications données par le **compas magnétique**.



Cette opération ne peut s'effectuer que lorsque le compas est exploitable, c'est-à-dire dès le départ une fois aligné sur la piste, ainsi qu'en vol horizontal stabilisé.

Ci-contre le modèle utilisé par Charles Lindbergh les 20 & 21 mai 1927 pour traverser l'atlantique nord (en 33 h 30').

Charles Lindbergh

et le

"Spirit of Saint Louis"

... ne disposant d'aucune visibilité vers l'avant !!!



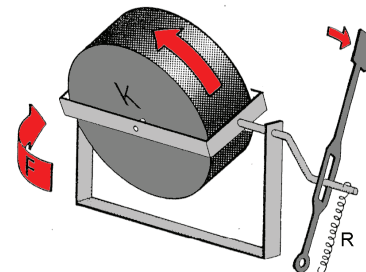
Spirit of St. Louis



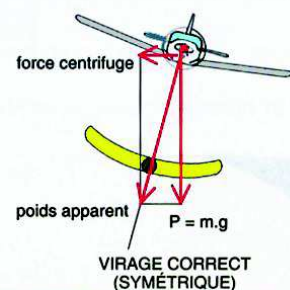
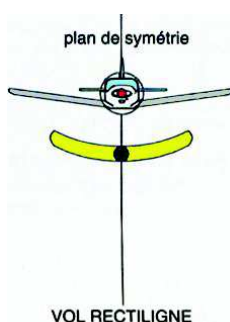
1) Présentation de l'indicateur de virage ou bille-aiguille

Il s'agit d'un **gyroscope** qui permet de visualiser le taux de virage (et non l'inclinaison) de l'avion à l'aide d'une **aiguille** (parfois remplacée par une "maquette"). Il est associé à une **bille** métallique enfermée dans un tube en verre incurvé vers le bas et rempli d'un liquide amortisseur. ... d'où son autre appellation : **bille-aiguille**.

Le fonctionnement fait ici appel à la DEUXIEME propriété du gyroscope : K : Gyroscope ; F : sens du virage ; R : ressort de rappel.



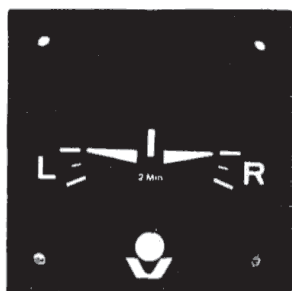
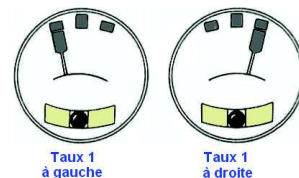
- La **bille** qui se déplace selon la verticale apparente renseigne sur la **symétrie du vol**. (Le vol est symétrique si la bille est au milieu).
- L'**aiguille** liée au gyroscope indique le **sens** et mesure le **taux de virage**.



2) Le taux de virage



Lorsque le virage est effectué avec l'aiguille positionnée sur la graduation le virage est effectué au **Taux 1** soit 360° en 2 minutes... (On trouve souvent l'indication : 2 min turn).

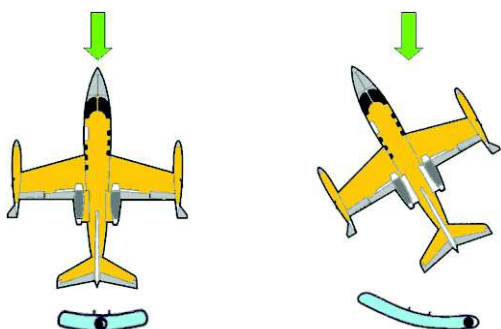


On peut ainsi déterminer un angle de rotation avec ... une montre (3° /secondes). Cela pourrait être utile pour s'aligner sur la piste en partant du vent arrière en 1 minute (180°).

- A gauche pas de virage.
- A droite virage à droite ($R = right$) au taux 1. Vol symétrique.



3) La symétrie du vol en utilisant la bille



Lorsque la bille n'est pas centrée le vol n'est plus symétrique (il est **dérapé** ou **glissé** selon que la bille est à l'extérieur ou à l'intérieur du virage).

Pour rattraper la symétrie, le pilote utilise les palonniers... "**le pied va chercher la bille**" signifie ajouter "du pied" du côté où la bille est déplacée.

- Ici le pilote doit "mettre du pied" à droite... pour ramener l'avion dans le schéma de vol "normal".



1) Introduction

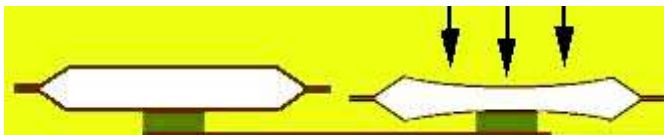
Trois instruments utilisent des mesures de pression.

- L'**altimètre** (pression statique)
- Le **variomètre** (Comparaison entre pression statique et variation de pression).
- L'**anémomètre** (Comparaison entre pression statique et pression dynamique ou totale).



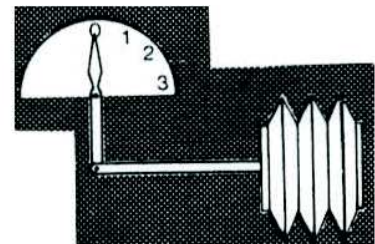
2) Principe de la mesure

Ces différents appareils utilisent tous une (ou plusieurs) **capsule anéroïde** appelée aussi **capsule de Vidie**.(ci-contre)



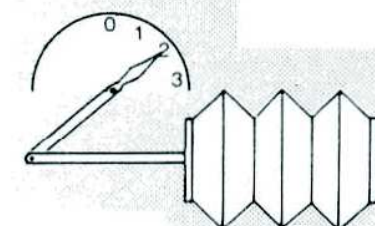
Cette capsule se déforme s'il existe une différence entre sa pression intérieure et la pression extérieure (ici plus forte).

L'information est récupérée par un système mécanique qui amplifie la déformation et l'indique sur un cadran (aiguille).

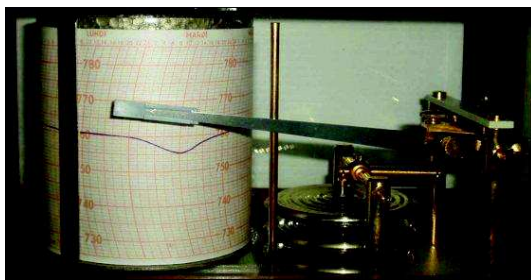
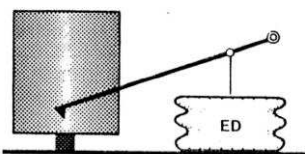


Forte pression = capsule comprimée

On peut ainsi réaliser un **baromètre** pour mesurer la pression atmosphérique. (ci-dessous un modèle qui l'enregistre sur un tambour tournant)



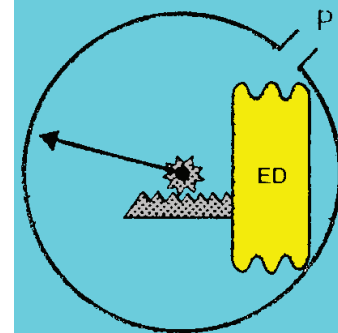
Faible pression = capsule détendue





1) L'altimètre... est un baromètre !

Puisque la pression varie avec l'altitude (voir cours météo) un baromètre pourra aussi servir d'altimètre.... A condition de pouvoir régler sa valeur à zéro au niveau de la mer. (QNH)

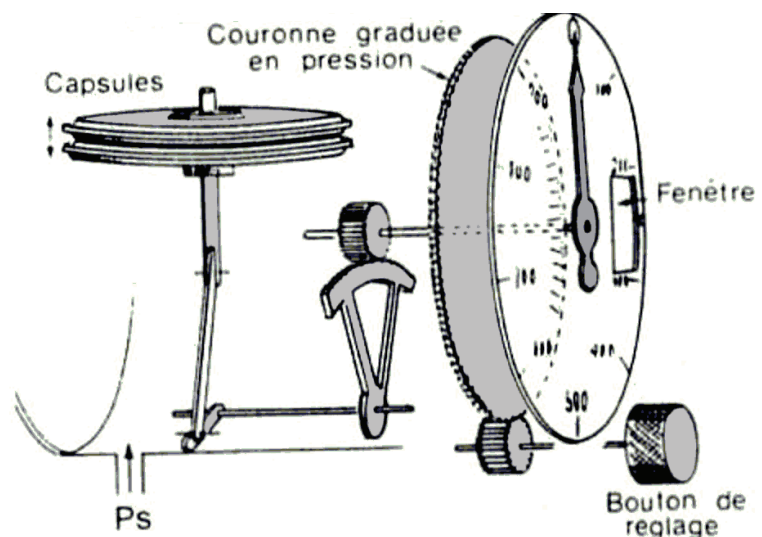


On utilise donc une capsule (ED) fermée placée dans une enceinte relié à la pression statique (P).

La réalisation de l'appareil qui doit amplifier de très faibles déformations et en outre être ajustable est plus complexe.

On retrouve toutefois les principaux éléments.

- Capsules
- Amplification mécanique
- Aiguille
- Réglage de référence (QNH ; QFE ; QNE = 1013,25...)



Tous les altimètres sont munis d'une fenêtre où apparaît une échelle de pression **graduée en hecto pascals (hPa)**.

Le cadran, lui, est généralement **gradué en pieds (ft)**. 1 ft # 0,30 m. donc 300 m = 1000 ft
L'altimètre comporte DEUX aiguilles.

- La plus courte indique les 1000^{iers} de pieds (ft).
- La plus longue donne une indication plus fine (100 ft sur les nombres et 10 ft par graduations inférieures).

On remarque aussi le bouton de réglage à gauche et la fenêtre correspondante à droite.



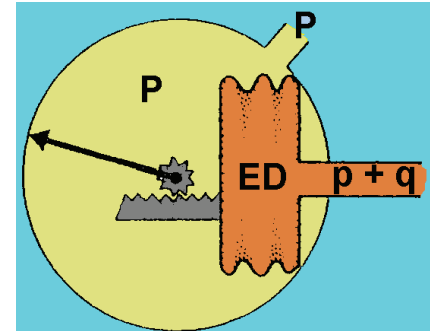


1) Présentation de l'anémomètre ou Badin

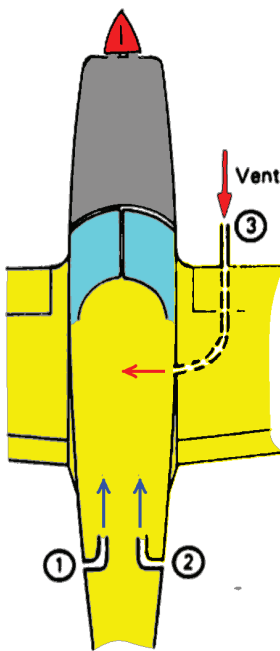
- Il mesure la vitesse de l'aéronef par rapport à l'air qui l'entoure.

Le but est ici de mesurer la vitesse de l'avion dans la masse d'air.

On va donc déterminer la pression dans un tube (tube de pitot) qui est soumis au vent relatif et comparer cette pression ($p + q$) à la valeur de la pression statique (p) mesurée sur le côté de l'avion.

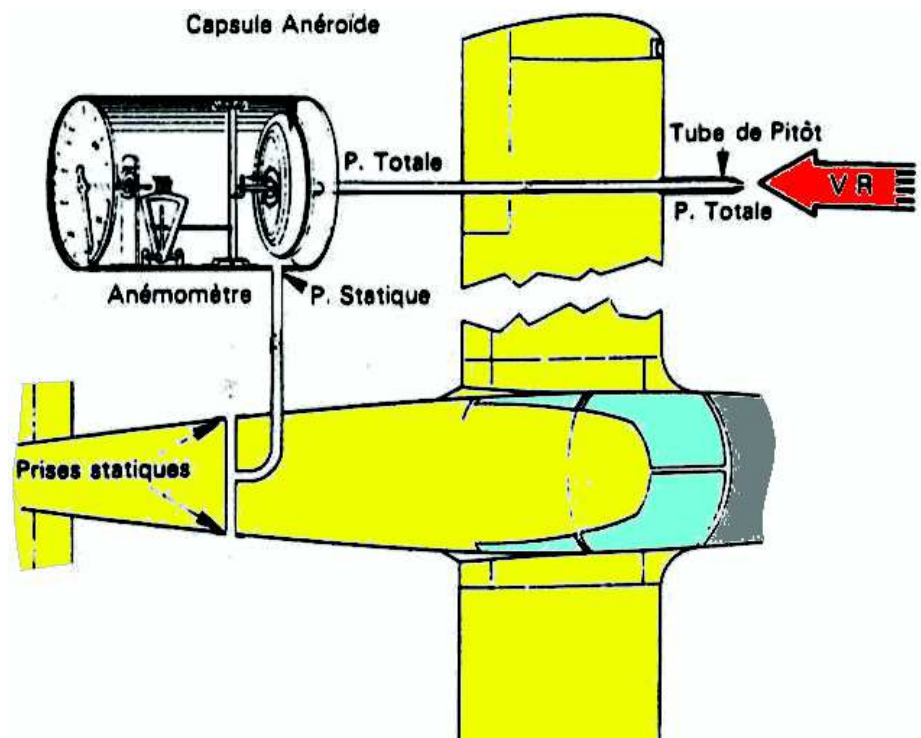


- P = pression statique ;
- $p + q$ = pression totale ;
- ED = capsule élastique.



① et ② Prises de Pression Stati

③ Prise de Pression-Totale



- L'antenne ou capteur de pression totale.



Le capteur de pression totale (dynamique) est une "antenne" extérieure appelé "**Tube de Pitot**".

Cette **antenne** peut éventuellement disposer d'une prise statique et de dispositifs électriques de dégivrage.



Les orifices des différentes prises de pression sont obstrués lorsque l'avion est sur un parking.

Le pilote du prochain vol retirera ces protections lors de la visite prévol.



- Significations des arcs de couleur

On trouve sur l'indicateur :

- une **plage blanche** : évolutions **volets sortis** (Entre V_{S0} et V_{FE})
- une **plage verte** : **évolutions normales**
- une **plage jaune** : ne pas utiliser en air turbulent
- un **trait radial rouge** (V_{NE}) : Vitesse à **ne jamais dépasser**

L'anémomètre prend en compte la densité de l'air.

Sachant que la densité de l'air diminue lorsque l'altitude augmente, pour une même **vitesse propre (V_p)**, la V_i sera plus faible en altitude.



- Détaillons ces plages.

Arc blanc: de V_{FE} à V_{S0} : zone d'utilisation normale en configuration atterrissage

- V_{S0} : vitesse de décrochage volets et train sortis (configuration atterrissage);
- V_{FE} : (FE pour "Flaps.extended" volets sortis).

C'est une vitesse au-delà de laquelle l'aile, le volet ou l'avion subit une déformation grave s'il est plein braqué. C'est donc la vitesse maxi d'utilisation des volets.

Arc vert: zone d'utilisation normale limitée par V_{S1} et V_{NO} où:

- V_{S1} : vitesse de décrochage en lisse (S pour "Stall" : décrochage en anglais);
- V_{NO} : vitesse à ne pas dépasser en atmosphère agitée (NO pour Normal Operating).

En fait, on prendra garde de ne pas la dépasser car son dépassement donne une marge par rapport à la V_{NE} inacceptable: une manoeuvre ou une rafale alors que l'avion vole à une vitesse supérieure ou égale à V_{NO} , peut induire des déformations permanentes de l'avion (aile, gouvernes, aile/fuselage, etc.), et peut conduire à la rupture.

Tout dépassement par inadvertance de V_{NO} doit être rapidement corrigé.

Le vol à V_{NO} réduit la marge de sécurité en manoeuvre et en rafale concernant la résistance structurale.

Arc jaune : de V_{NO} à V_{NE} (trait rouge) la zone est interdite en atmosphère turbulente,

- V_{NE} : (NE pour Never Exceed), à ne jamais dépasser, en anglais).

La VNE conduit irrémédiablement à une dégradation grave de l'avion si par chance, celui-ci n'est pas détruit. La VNE ne doit jamais être atteinte dans la vie de l'avion.

Il existe de même une VLE qui est souvent supérieure à VFE, relative à la configuration train sorti (LE pour "Landing gear Extended", train sorti). Certains avions munis d'essuie-glace ont une vitesse maximale d'utilisation de cet essuie-glace.

- **Récapitulatif des vitesses qui limitent les arcs de couleur**

V_{S0} vitesse de décrochage en config atterrissage à masse max. **Velocity Stall**

V_{FE} Vitesse maxi volets sortis **Flap Extended**.

V_{S1} vitesse de décrochage en lisse.

V_{NO} Vitesse maxi en air agité **Normal Operating**.

V_{NE} Vitesse à ne jamais dépasser **Never Exceed**.

- **D'autres limites existent (non exigibles au BIA)**

V_{LE} Vitesse limite (maxi) train sortis **Landing gear Extended**.

V_{LO} Vitesse limite (maxi) de manœuvre du train **Landing gear Operating**.

V_{FO} Vitesse limite (maxi) de manœuvre des volets **Flaps Operating**.

- **D'autres vitesses utiles:**

- **1,3 VS: c'est la vitesse d'approche communément préconisée;**

La marge de 30 %, par rapport à la VS configuration adoptée est reconnue suffisante pour conduire une approche où les évolutions seront raisonnables.

- **1,45 VS: c'est une vitesse d'approche majorée (situation à risque).**

C'est une vitesse qui garantit que l'on reste encore 30 % au-dessus de la V de décrochage sous facteur de charge, en virage, tant que l'inclinaison reste inférieure ou égale à 37°. (*Nota: cette inclinaison et cette marge sont les mêmes pour tous les avions*).

- **Étalonnage.**

Le point important à saisir est qu'il est étalonné uniquement pour les conditions d'atmosphère standard, au niveau de la mer et à 15° C; c'est-à-dire que la vitesse que l'on lira à la pointe de l'aiguille ne sera en toute rigueur la vitesse propre que si P = 1013,25 hPa et T = 15° C.

Dans les autres cas: interprétation des lectures :

Aux erreurs d'instruments près que l'on négligera, l'aiguille pointera sur une vitesse indiquée (Vi), ou vitesse lue, ou vitesse conventionnelle (Vc).

Mais celle-ci n'est pas égale à la vitesse vraie ou vitesse propre (Vp): il convient d'appliquer une correction barométrique (liée à la variation de densité de l'air) comme suit:

+ 1 % par tranche de 600 ft au-dessus de la surface 1013,25 hPa.

- **Il faut retenir que :**

Le respect des plages de vitesses (utilisation en fonction de la configuration ou de la phase du vol) garantit la sécurité, en établissant des marges. **Un avion ne peut impunément voler :**

- **trop lentement sous peine de décrochage ;**
- **trop vite sous peine de déformations ou ruptures.**

Des marges sont prévues pour ne pas s'approcher dangereusement des valeurs critiques (1,3 VS pour VS, VNO pour VNE).

2) Exercices de correction de vitesses (CAEA)

- Exercice 1

Déterminer la vitesse réelle (sans vent) si :
vitesse lue = **150 kt** ; altitude = 2000 ft ;
QNH = 999 hPa ;

Rappel : 1 hpa correspond à 28 ft (voir cours météo)

- Solution 1

Ecart par rapport à la surface 1013 hPa : 2000
+ (1013 - 999) x 28 = 2400 ft environ
d'où 4 tranches de 600 ft, ainsi correction = + 4
% x 150 = 6 kt. Finalement : **Vp = 156 kt**

- Exercice 2 (quasiment le même !)

Déterminer la vitesse réelle (sans vent) si :
vitesse lue = **180 kt** ; altitude = 3500 ft ;
QNH = 990 hPa

- Solution 2

Ecart par rapport à la surface 1013 hPa : 3500
+ (1013 - 999) x 28 = 4144 ft environ
Soit environ 7 tranches de 600 ft, ainsi
correction = + 7 % x 180 = 12,6 kt
Finalement : **Vp = 193 kt**



1) Présentation du variomètre

Le but est ici de détecter une **montée** ou une **descente** de manière quasi instantanée. Donc plus rapidement qu'en observant les variations de l'altimètre.

La capsule anéroïde (ED pour déformation Elastique) est ici tout simplement reliée à l'extérieur (pression statique) par un capillaire noté K sur le schéma (tube très fin). A est un "réservoir" appelé aussi "capacité" qui amplifie le retard à l'équilibre des pressions.

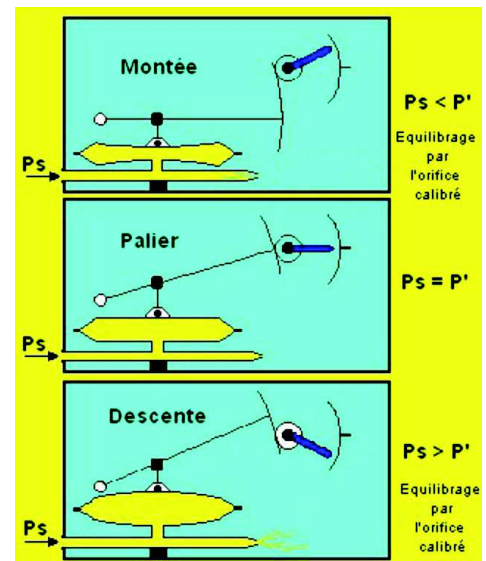
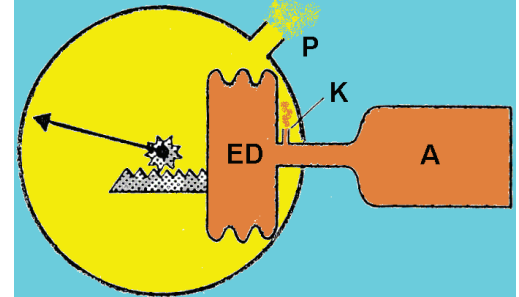
En vol stabilisé l'indication est donc toujours zéro (0).

En cas de variation d'altitude la pression intérieure n'est pas immédiatement égale à la pression extérieure car le capillaire avec un débit d'air très faible retarde le retour à l'équilibre.

ATTENTION : Notez au passage que les 2 schémas correspondent à DEUX types de construction différents.

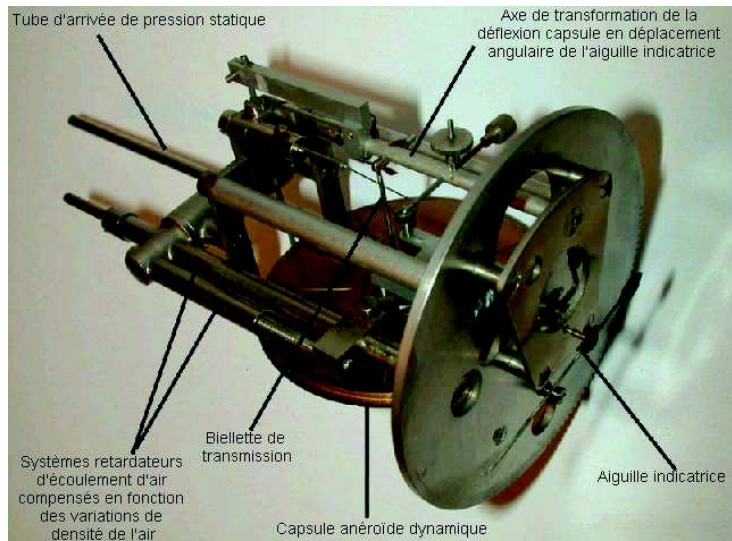
Pour le schéma unique en haut une descente fait augmenter PS et la capsule ED ayant du "retard" s'écrase...

Pour le schéma triple une descente fait augmenter PS et la capsule ayant du "retard" se dilate... le réservoir d'amplification étant ici joué par le volume intérieur de l'appareil.

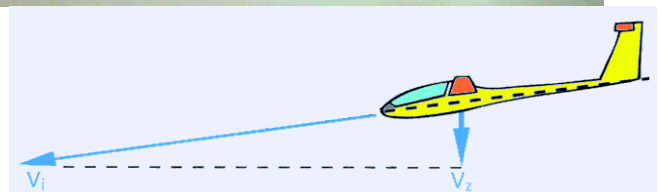


Le variomètre est généralement **gradué en pied par minute (ft/mn)**, il permet de mesurer la **vitesse verticale** de l'avion (VZ).

Vue intérieure (mécanisme) le corps de l'appareil qui constitue aussi le "réservoir" tampon a été enlevé.

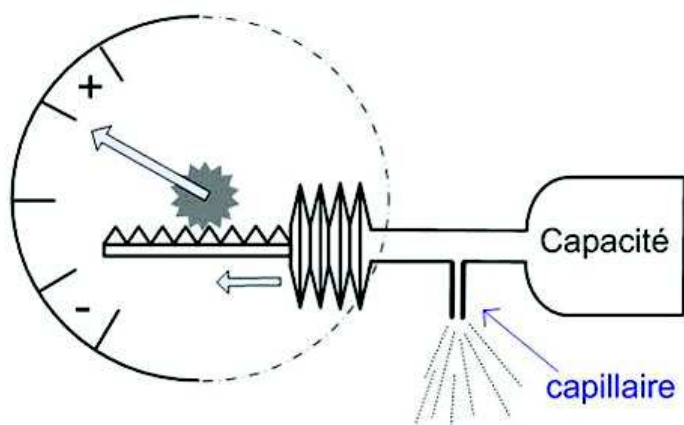


Le variomètre (indique Vz) est très utilisé par les **pilotes de planeurs**.



2) Autres schéma du variomètre à capacité (CAEA)

Un vario "classique" possède généralement deux connecteurs: l'un se branche sur les **prises statiques** (pour un vario non compensé) ou sur l'**antenne de compensation** (le même vario sera alors compensé), l'autre se connecte sur la bouteille thermos (isolant thermique) qui sert de capacité. La capacité ne se branche pas sur une prise d'air extérieure. Elle recueille la pression statique ou compensée à travers le vario. C'est le retard induit par ce passage à travers l'instrument qui fait fonctionner le vario.



3) Le variomètre à énergie totale (CAEA)

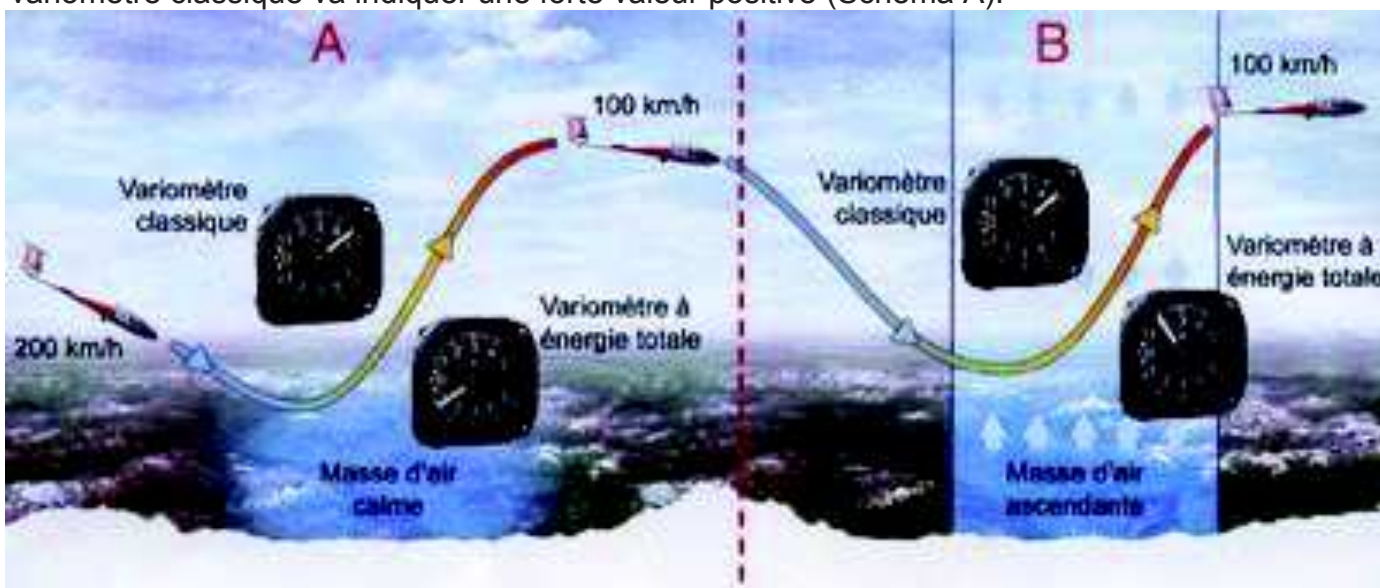
- Pourquoi un autre variomètre ?

Le **variomètre à énergie totale** est utilisé sur les planeurs. En pratique un planeur descend toujours mais il doit utiliser les ascendances pour reprendre de l'altitude. Il est donc très intéressant de savoir si, par rapport au sol, le planeur monte... ou descend. C'est à cela que sert le variomètre à énergie totale.

Cet appareil tient compte de l'énergie cinétique mais aussi de l'énergie potentielle car, pendant le vol, l'énergie potentielle et l'énergie cinétique s'échangent en continu. La somme d' E_c et d' E_p s'appellant l'énergie mécanique... elle prend ici le nom d'énergie totale.

- Utilisation en air calme

Un planeur qui effectue une ressource en air calme, va prendre de l'altitude (augmentation de l'énergie potentielle) et va perdre beaucoup de vitesse (diminution de l'énergie cinétique). Par conséquent, son énergie totale va légèrement diminuer (perte continue par les effets de la traînée), et le variomètre à énergie totale va indiquer une valeur négative, alors que le variomètre classique va indiquer une forte valeur positive (Schéma A).



Ressources en air calme (A) et en air agité (B)

Par contre, si le planeur effectue une ressource dans un air ascendant, le gain en altitude sera plus important qu'en air calme pour une même perte de vitesse. Dans ce cas, l'augmentation de l'énergie potentielle est supérieure à la diminution d'énergie cinétique. Sur le variomètre à énergie totale, le pilote lira une valeur sensiblement positive alors que sur le variomètre classique, il lira une valeur exagérément positive.



Vario B40 de BORGELT
INSTRUMENTS

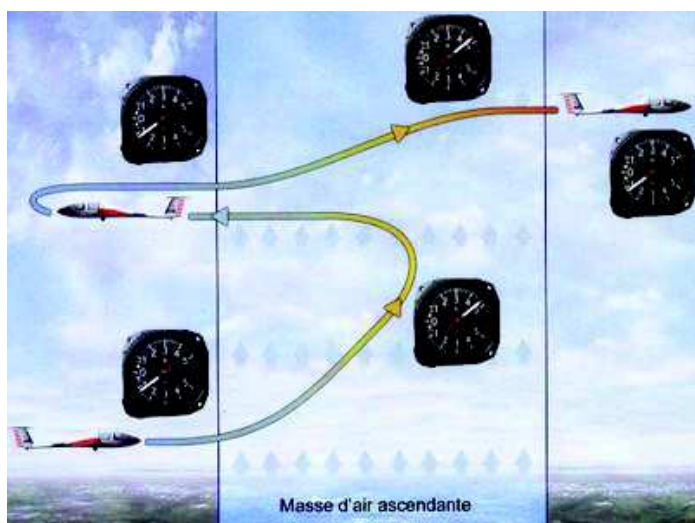
Néanmoins, le variomètre à énergie totale, donne exactement la même valeur lorsque le planeur vole à vitesse constante que le variomètre classique, mais cela uniquement dans un air calme.

En outre, en raison du retard (de 1 à 5 secondes) du variomètre, l'ascendance constatée peut se trouver, parfois, bien loin derrière le planeur, avant que l'aiguille ne se mette à bouger positivement. Le pilote doit donc anticiper en permanence les mouvements de l'aiguille.

Source : http://home.nordnet.fr/dmorieux/planeur_variometre.htm très bien réalisé

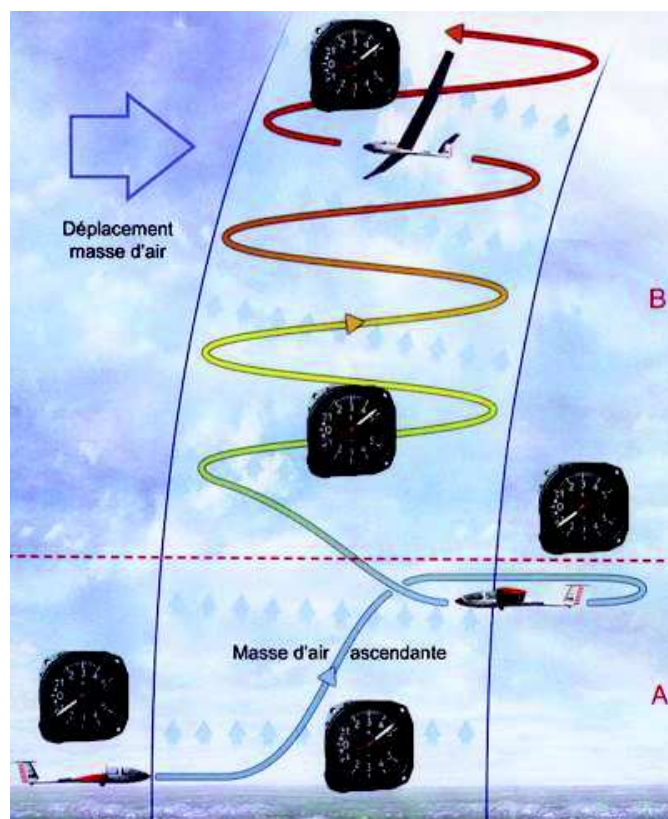
- **Piloter un planeur ... trouver et spiraler dans l'ascendance :**

Rien ne sert de débiter une spirale trop tôt alors que l'aiguille du variomètre continue de monter, car, dans ce cas, l'aiguille va redescendre d'un coup avant de passer en négatif. En effet, le pilote entré dans une masse d'air ascendante, vient d'en sortir. Pour y retourner, il doit revenir sur ses pas.



Mise en virage trop hâtive - La masse d'air ascendante est derrière.

Rien ne sert d'attendre trop longtemps avant d'engager une spirale car l'aiguille du variomètre va passer par une valeur maximale avant de redescendre. Pour que l'aiguille remonte, le pilote doit faire demi-tour pour entrer à nouveau dans la masse d'air ascendante.



Mise en spirale - Le couloir ascendant étant mal centré (B), le pilote doit décaler pour suivre son déplacement.

De plus, l'inclinaison du planeur doit être proportionnelle à la puissance et à la taille de l'ascendance. En effet, plus les mouvements de l'aiguille du variomètre sont brusques et importants, plus la spirale est serrée. Dans ce cas, le pilote ne doit pas oublier d'être attentif aux dangers du vol à forte inclinaison.

A noter que, sur les planeurs modernes, les problèmes de compensation et d'interprétations sont écartés par l'usage de variomètres électroniques.

4) Le variomètre électronique :

Le **variomètre électronique** ou électrique installé sur un planeur qui permet de régler les problèmes de compensation et d'interprétations, a, par ailleurs, l'avantage de délivrer un signal sonore en relation avec les mouvements verticaux :

- Sons aigus pour les valeurs positives.
- Sons graves pour les valeurs négatives.



Le modèle LX 166 capable aussi d'afficher le plan de descente vers l'aérodrome de départ !

Cette particularité du **variomètre électronique** permet ainsi au pilote de se concentrer sur son pilotage et sur l'observation de son environnement de vol.

Ensemble de documents venant de : http://home.nordnet.fr/dmorieux/planeur_variometre.htm#S4

5) Le pilotage au variomètre :

Le pilote de planeur a pour objectif constant celui de prendre de l'altitude lors de son vol qu'il soit local ou de navigation.

Pour cela, le pilote utilise la lecture du variomètre qui permet de déterminer si le planeur gagne de l'altitude ou bien en perd dans son vol.

Cependant, pour utiliser une masse d'air ascendante, le pilote doit anticiper en permanence les mouvements de l'aiguille du variomètre à énergie totale ou de celle du variomètre électronique.

En effet, entrer dans une masse d'air ascendante n'est pas tout, le pilote doit savoir l'exploiter au mieux et rester dedans le plus longtemps possible.

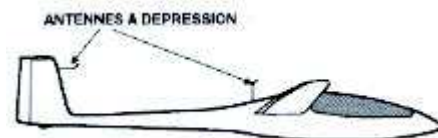
Si l'aiguille du variomètre chute lentement, le pilote doit décaler sa trajectoire par une courte ligne droite de 2 à 4 secondes, avant de virer à nouveau du même côté, et ainsi de suite jusqu'à retrouver le taux de montée initiale.

De plus, à chaque changement de trajectoire, le pilote doit mémoriser sa position dans l'espace afin de pouvoir, à tout moment, revenir dans cette position et de connaître aussi le déplacement de la zone ascendante.

Ensemble de documents venant de : http://voiletech.free.fr/skyassistant/energie_totale.htm Ce site très documenté fourni même les plans d'un système électronique. Il développe les solutions pour planeur grandeur et pour les modélistes.

6) Emplacement de l'antenne :

L'**antenne de compensation** devra être placée dans un endroit où elle ne sera pas influencée par le champ aérodynamique du planeur. Ici deux solutions possibles :

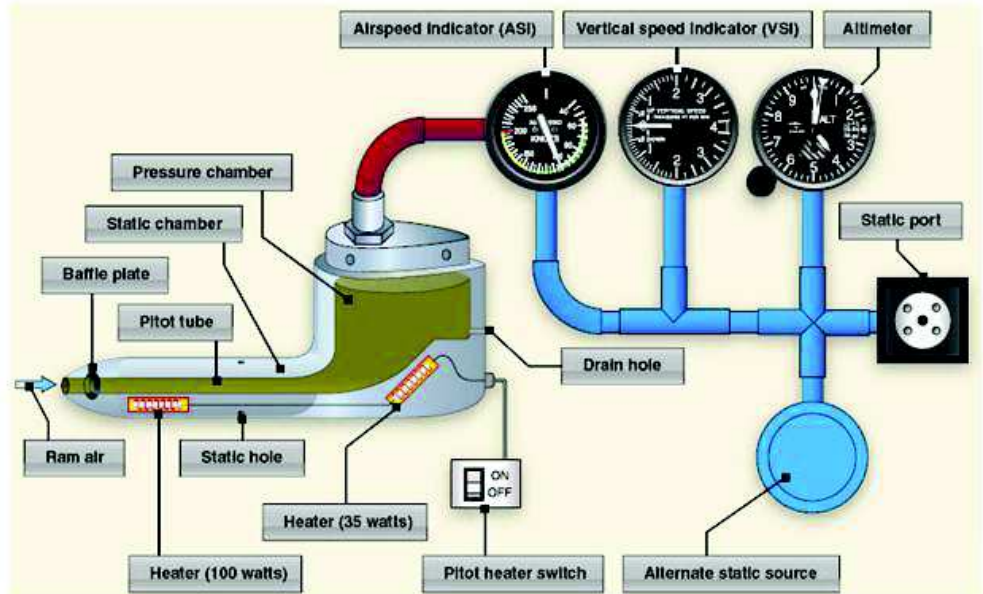




1) Schéma complet du système "mesures basées sur les pressions"

Notez les détails de la prise statique, repérez la prise alternative (sécurité) en cas de problèmes avec la prise standard.

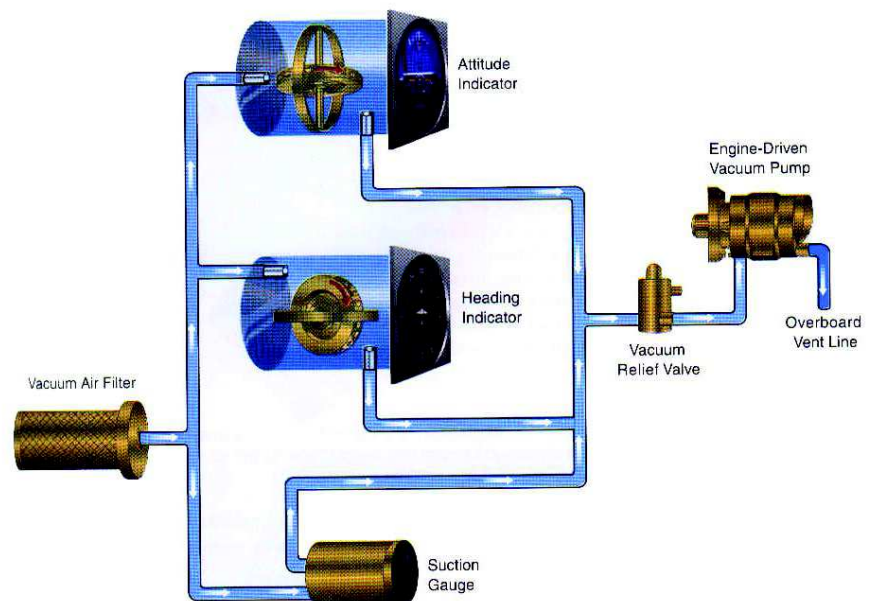
Notez le système de réchauffage (antigivre).



2) Schéma pour des ensembles gyroscopiques pneumatiques

Notez le sens de circulation de l'air, la pompe et les filtres.

Une indication particulière est placée sur le tableau de bord afin de vérifier le bon fonctionnement de la dépression.

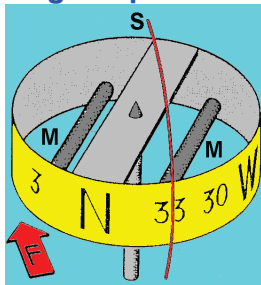
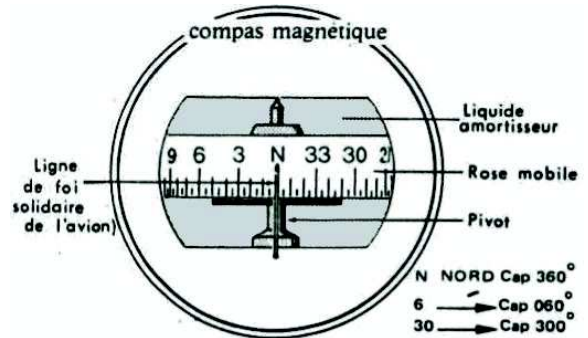




1) Le compas

L'avion, à la différence de l'automobile ou du train peut s'affranchir des itinéraires imposés puisque un de ses avantages est de pouvoir se déplacer en ligne droite. Pour cela on utilise une boussole "adaptée" à l'environnement "avion" : le compas qui permet de mesurer l'orientation de la trajectoire.

C'est une boussole élaborée, dont l'élément indicateur est une **rose des caps** associée à un barreau aimanté. Il indique la position du plan de symétrie de l'avion par rapport à la direction du **Nord Magnétique**.

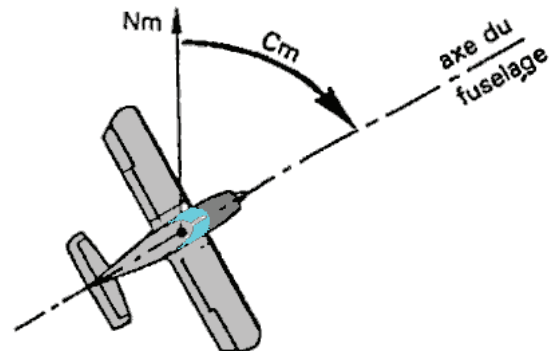
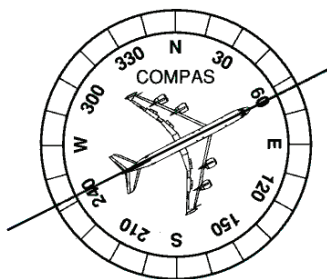
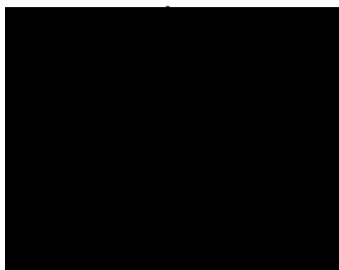


- M** : aimants
- F** : direction du vol
- S** : ligne de foi

L'information de cap est donnée par le déplacement d'un repère, la **ligne de foi** (liée à l'avion) devant la rose des caps constituée d'un plateau circulaire gradué de 0 à 360° flottant sur un liquide enfermé dans un récipient étanche.

Certaines directions particulières y sont repérées par des lettres : N pour le nord, E pour l'est, S pour le sud, W pour l'ouest

La rose des caps est divisée en 360°.



Ses indications comportent toutefois des erreurs dues à sa fabrication et à l'environnement dans lequel il est installé.

On en tient compte au moyen d'une courbe de compensation.

For	N	30	60	E	120	150	
Steer	-2	-3	-2	0	+1	0	
For	S	210	240	W	300	330	
Steer	-2	-3	-2	0	+1	0	
Date:	03/11/04					F-GYGA	

Cet instrument très simple n'est plus fiable lorsque l'avion n'est pas stable sur une trajectoire rectiligne, horizontale et à vitesse constante.

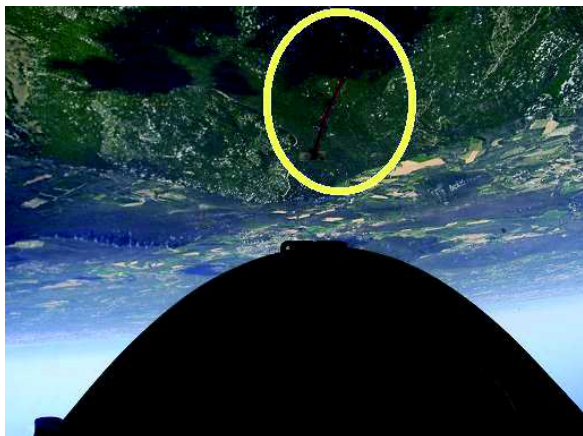
Il donne des indications erronées dans certaines aux conditions de vol :

- principalement : en virage (inclinaison),
- lors des variations de vitesses,
- en air agité (turbulences, inclinaison...),

d'où l'intérêt d'utiliser un instrument complémentaire : le conservateur de cap ou directionnel.



1) Le brin de laine utilisé en vol à voile



Très simple et très efficace le **brin de laine** permet de connaître la direction du vent apparent et donc la symétrie du vol...

C'est la "bille aiguille" du planeur.

Ici en looping !

(La planète est au dessus !!!)

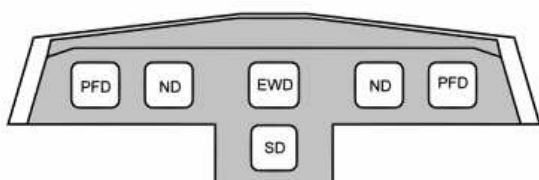
2) Les tableaux de bords électroniques

- L'EFIS (systèmes d'information électroniques de vol).

Les EFIS (*Electronic Flight Information Systems*) désignent les nouveaux systèmes de présentation des instruments de bord sur écrans.

Sur les EFIS sont regroupées les informations auparavant disponibles sur les instruments dits "classiques" tels que l'altimètre, le variomètre, le badin, les paramètres moteurs, les paramètres des circuits, l'horizon artificiel etc... Ce type de représentation permet d'éviter la multiplication des cadrans de toutes sortes, mécanismes électromécaniques complexes et fragiles et de regrouper toutes les informations d'une façon nettement plus ergonomique. De plus, un même écran pouvant accueillir des informations différentes alternativement, un gain de place majeur est réalisé sur la planche de bord. L'adjonction facile de représentations colorées aux teintes variables et la possibilité d'introduire des éléments dynamiques enrichissent encore l'affichage.

Sur un avion de ligne le tableau de bord est bâti autour de 4 écrans dont 2 sont doublés afin de fournir les informations principales de la même façon aux deux pilotes.



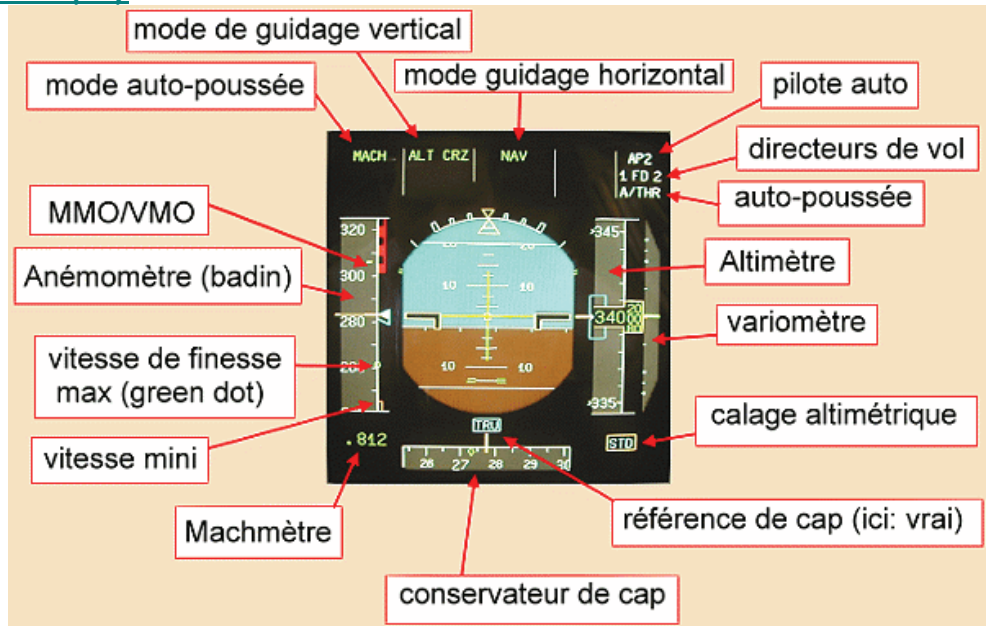
Le plus important est le **PFD**
(*Primary Flight Display*)

Ci-contre un tableau d'Airbus A319



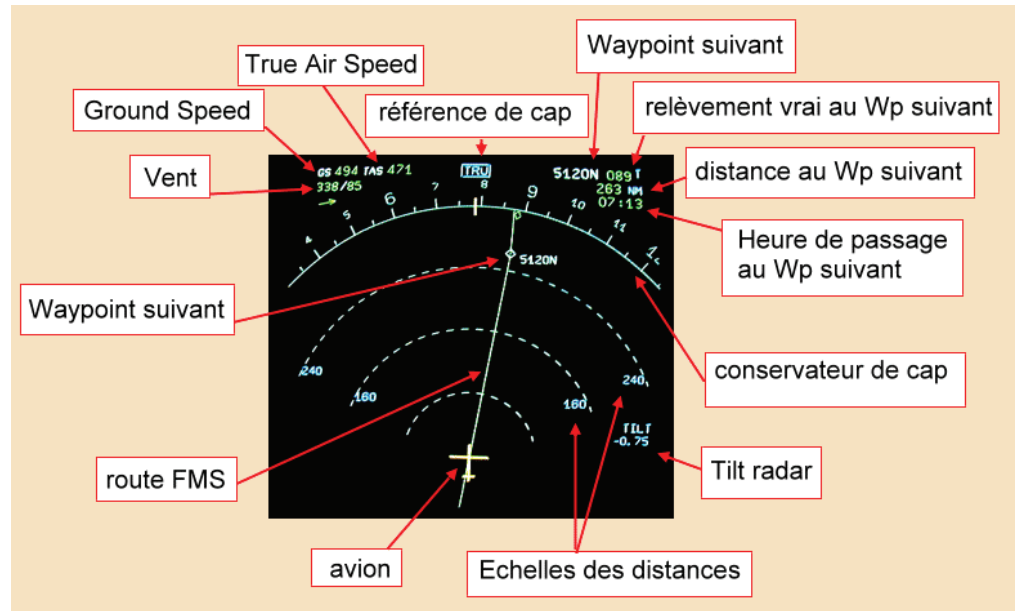
• le PFD Primary Flight Display

Chaque pilote dispose d'un PFD devant lui. Cet écran regroupe tous les paramètres primaires du vol dont **l'horizon artificiel**, **l'altimètre**, **variomètre**, **conservateur de cap**, **Machmètre** ainsi que les informations d'engagement ou d'armement des automatismes et des directeurs de vol.



Les (EFIS) intègrent tous les paramètres de vol dans un instrument optimisé.

Ces systèmes modernes offrent l'augmentation de fiabilité, la réduction de poids, l'installation simplifiée et des économies globales par rapport à un tableau de bord classique.



• Système d'instrument de moteur (SME)



Cet instrument déjà très complet peu partager son écran avec d'autres paramètres (ici moteur).



3) Le machmètre. (CAEA seulement)

Le machmètre évalue le **nombre de Mach** qui représente une performance aérodynamique.

Le nombre de Mach étant le rapport entre la vitesse avion et la célérité du son. $M = V/C$.

La valeur du Mach est variable en fonction de l'altitude ou du niveau de vol, et par conséquent, de la température. Cela vient du fait que la vitesse du son varie avec la température selon une loi linéaire.

Quelques valeurs à titre d'illustration :

à **15° C** Mach 1.0 = 660,9 Kts = 1224 Km/h

à **0° C** Mach 1.0 = 644,5 Kts = 1190 km/h

à **-45° C** Mach 1.0 = 620 Kts = 1150 Km/h

à **-56° C** Mach 1.0 = 572 Kts = 1060 Km/h

C'est également un instrument de navigation qui permet de déterminer de manière très précise (*beaucoup plus que l'anémomètre*) la vitesse propre de l'avion, dès que l'on connaît la température statique extérieure.

$$C_{m/s} = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot P_s}{\rho}} = 20,04 \cdot \sqrt{T^\circ \cdot K}$$

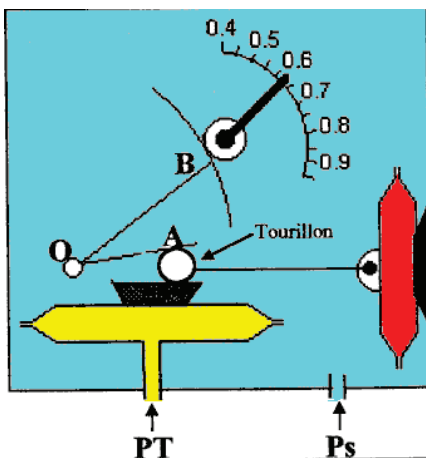
PRINCIPE DE LA MESURE

On utilise la **loi de St Venant** qui devient :

$$\frac{P_d}{P_s} = \frac{PT - P_s}{P_s}$$

On constate que les variations de masse volumique de l'air n'ont plus d'influence sur la mesure. **Cet instrument est le plus précis des instruments de mesure aérodynamique.**

Il n'est utilisable qu'à partir de M 0,3



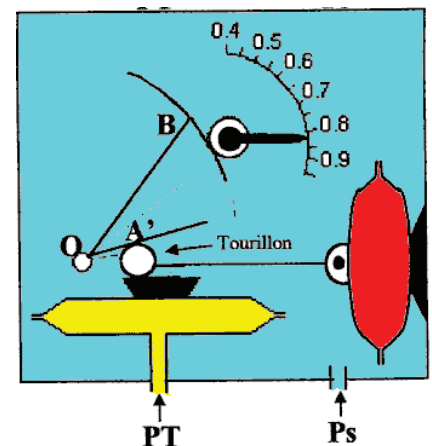
REALISATION

La réalisation de l'appareil s'appuie sur l'expression ci-dessus.

PT-Ps est mesuré par la capsule anéroïde dynamique.

La Ps est obtenu directement sur la capsule anéroïde statique.

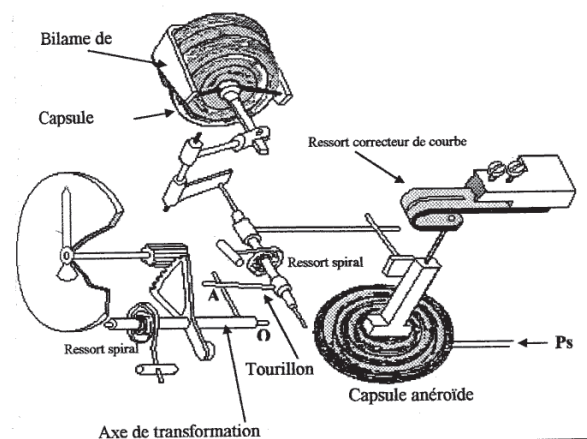
Le rapport des pressions correspond à un nombre de Mach. On lui fait correspondre un rapport mécanique (OB/OA) qui varie en fonction de la Ps qui est une fonction de l'altitude Zp et donc directement liée à C.



Le célèbre machmètre du Concorde



L'anémomètre gradué en Kts "n'est plus utilisé" quand on vole en Mach. La vitesse indiquée (IAS) en Kts sur l'anémomètre est différente de celle calculée en Mach en référence à la vitesse du son. C'est pourquoi on voit toujours une vitesse en noeuds (kts) sur l'anémomètre, (IAS) différente et inférieure à la vitesse affichée sur le Machmètre.





1) L'horamètre :

L'horamètre décompte le temps de fonctionnement du moteur et non pas les durées correspondant aux mouvements de l'avion ou le temps de vol.

Le compteur commence à compter dès que la pression d'huile est établie (dès que le moteur tourne), et il s'arrête de compter dès que la pression d'huile tombe, (dès que le moteur s'arrête).

2) Autres instruments :

Dans un avion il existe de très nombreux instruments. Les plus importants sont pour la surveillance moteur pour le pilotage et pour la navigation....

Viennent ensuite beaucoup de détails indispensable pour garantir la sécurité.



- Instruments de surveillance des systèmes

- Gyro succion** (pression de la pompe à vide) pour la dépression d'alimentation des gyroscopes mécaniques
- Voltmètre** et **ampèremètre** pour la surveillance du circuit électrique
- Manomètre de pression d'huile**
- Manomètre de pression d'essence**
- Manomètre de pression d'admission**
- Température d'huile**
- Jauges carburant**
- EGT (Exhaust Gas Temperature)** température des gaz d'échappement. Peut aussi indiquer la température en sortie de réacteur.



Mesure de PA

- Le tachymètre :

Il indique le régime de l'hélice (en tr/min) ou du réacteur (en % d'un régime nominal).

- La montre (développé en radionav) :

Instrument indispensable à la navigation... Tout au moins avant l'avènement du GPS. Elle sert à suivre le log de Nav et à vérifier si les hypothèses (vitesse, dérive etc) sont vérifiées.

Dans le cas contraire elle permet d'estimer les corrections à apporter à ces grandeurs jusqu'au prochain point de report de Navigation.

- Le radio compas (développé en radionav) :

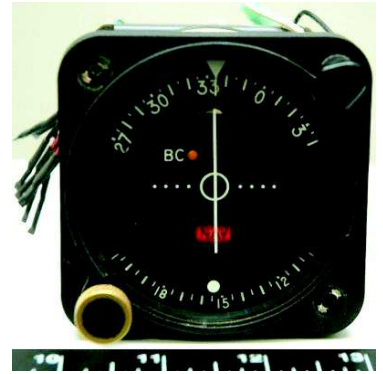
Une antenne sur l'avion capte un signal radio (dans la bande de fréquence de 190 kHz à 1750 kHz) émis par un émetteur au sol appelé NDB (Non Directional Beacon).

L'information délivrée au pilote est présenté par une aiguille qui indique la direction de cette station.

- Le VOR (développé en radionav) :

Une antenne sur l'avion capte un signal radio (dans la bande de fréquence de 108 à 118 MHz) émis par un émetteur au sol appelé VOR.

L'information délivrée au pilote est présentée par une aiguille qui indique le cap à suivre pour se diriger (ou s'éloigner, selon la sélection) vers cette station



- La manche à air (biroute): un instrument ... au sol

La manche à air est une indication au sol. Elle est destinée à indiquer la direction et une estimation de la vitesse du vent. Elle est constituée d'un manchon conique en tissu, composé de trois anneaux rouges et deux blancs alternés, attaché à un mât.

Ce dispositif, très simple, est situé à proximité de la piste des aérodromes, et permet au pilote de connaître approximativement la direction et la force du vent. Un avion décolle et atterrit face au vent. La plupart des avions ne peuvent pas décoller ou atterrir lorsque le « vent de travers » est trop important.

La manche à air reste utilisée sur les petits aérodromes. Sur un aérodrome contrôlé, les données météorologiques sont transmises par radio et les paramètres sont mesurés avec précision.



Chaque bande de couleur, lorsqu'elle est gonflée par le vent, correspond à peu près à **5 nœuds**.

Cela donne une estimation relativement précise de la vitesse du vent. (ici au moins 25 nœuds !)

On trouve aussi ce dispositif sur le bord des autoroutes pour avertir les automobilistes en cas de vent de travers important (viaducs, zones brusquement dégagées...).

- Le GPS

Très utilisé pour tous les moyens de déplacement terrestres il fait maintenant son apparition dans tous les objets volants.

Il rend obsolète beaucoup d'autres instruments en donnant la position précise la vitesse etc....

Celui qui lui fait confiance peut aussi prier pour qu'il ne tombe pas en panne car avec ce genre d'outil la navigation suivie point par point "à l'ancienne" devient beaucoup trop vite "oubliée"...



3) Le circuit visuel

L'instrument principal est l'Horizon artificiel, qui est le départ d'un circuit visuel que l'on parcourt en étoile.

Les instruments dits "secondaires" (traits jaunes) sont ceux que l'on vérifie de façon privilégiée dans telle ou telle configuration de vol. (montée, virage ...).

On ne passe pas d'un instrument secondaire à un autre sans repasser par le principal.

L'horizon donne les informations sur l'assiette de l'avion, (en tangage et roulis). L'altimètre et le conservateur de cap (ronds rouges) donnent la hauteur de l'avion et sa direction.

Ici, dans le cas d'un vol en palier, on surveille l'horizon pour maintenir l'avion dans son attitude, et l'oeil passe régulièrement sur le conservateur pour vérifier le cap, sur l'altimètre pour vérifier l'altitude, sur le badin pour vérifier la vitesse. Le coup d'œil sur la bille de temps en temps n'est pas inutile !



4) Le pilotage en panneau partiel

C'est une méthode de pilotage utilisée principalement au cours de l'instruction.

Elle consiste à simuler la panne d'un instrument de bord... et à continuer à piloter en remplaçant les informations de l'instrument manquant (*d'où le nom de panneau partiel*) par une combinaison d'autres informations provenant des autres instruments de bord.

C'est donc un exercice qui permet de retrouver l'information manquante à partir d'autres informations. Cet entraînement pouvant s'avérer salutaire en cas de panne réelle...

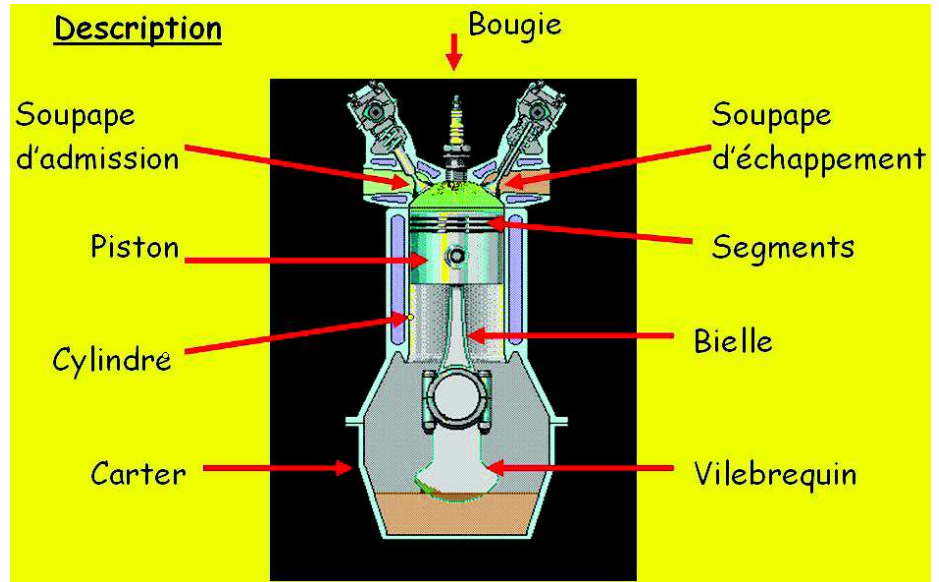
A COMPLETER



1) Description du fonctionnement d'un moteur "4 temps".

Les moteurs d'avion fonctionnent pour la plupart sur le même principe que celui des moteurs d'automobile.

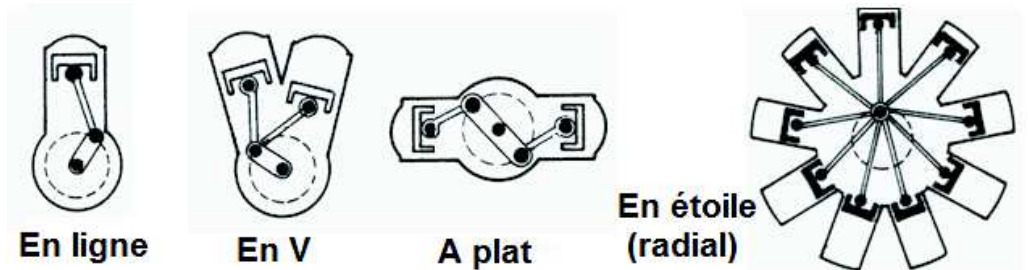
La figure représente les éléments fondamentaux qui sont le **cylindre**, le **piston**, la **bielle** et le **vilebrequin**. L'une des extrémités de la bielle est fixée au piston et l'autre au vilebrequin, qui transforme le mouvement rectiligne du piston en mouvement rotatif de l'axe qui entraîne l'hélice.



Sur la **culasse** qui ferme le cylindre, il y a généralement **deux bougies d'allumage** et **deux lumières**, fermées par des **soupapes** dont l'une sert à l'**admission** du mélange carburé et l'autre à l'**échappement** des gaz brûlés. Les soupapes sont commandées par un **arbre à cames** solidaire du vilebrequin. Le cycle de fonctionnement du moteur comprend **quatre temps** qui correspondent aux déplacements du piston.

2) Montage des cylindres :

Le nombre de cylindre est très variable (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12). Leur disposition est elle aussi très variée :



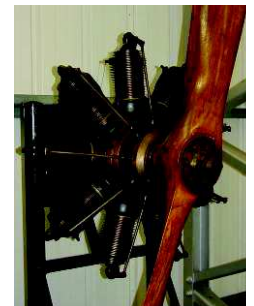
en ligne
(4 cyl en ligne du Flyer...)



en V (8 cyl en V - Hispano Suiza du Spad VII)



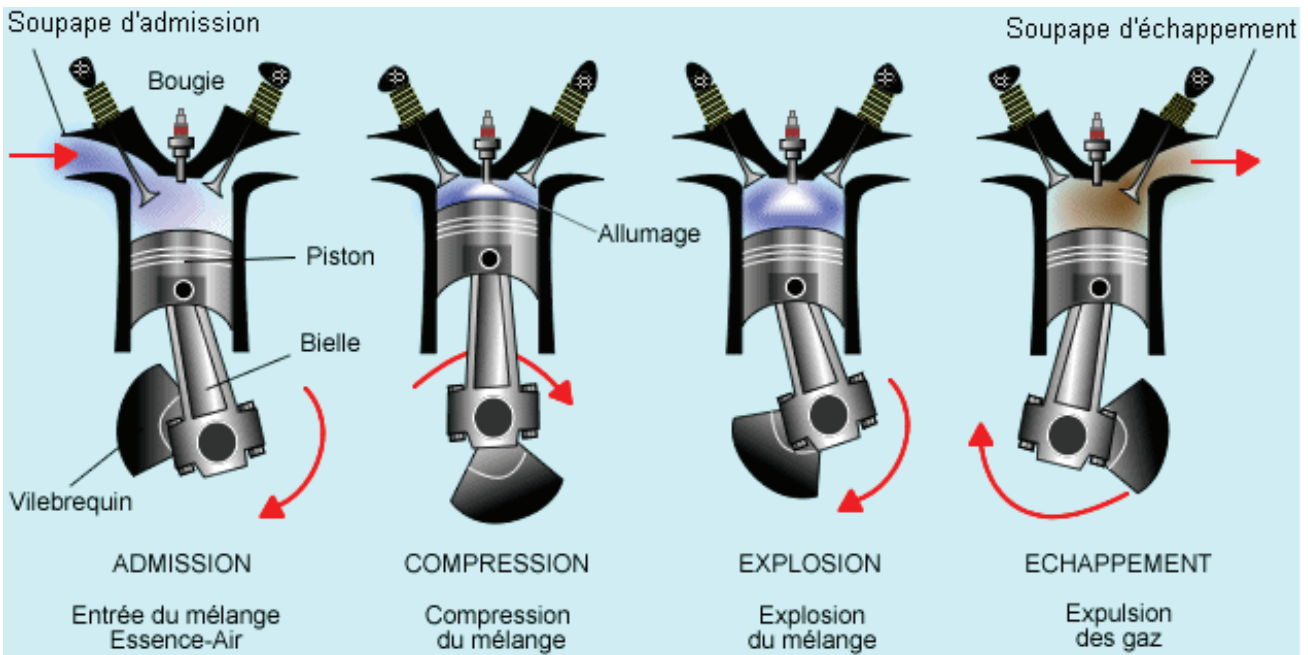
à plat
(Flat-four - Lycoming)



en étoile
(* 2 versions !)

(* Les moteurs en étoile peuvent être rotatifs (les cylindres tournent solidairement de l'hélice) ou fixes (l'hélice est solidaire du vilebrequin qui tourne alors que les cylindres sont fixés au châssis).

3) Le cycle de fonctionnement : Les quatre temps.



Admission :

Lors du **premier temps**, le piston s'éloigne de la culasse. La soupape d'admission est ouverte et le **mélange carburé est aspiré dans le cylindre.**

Compression

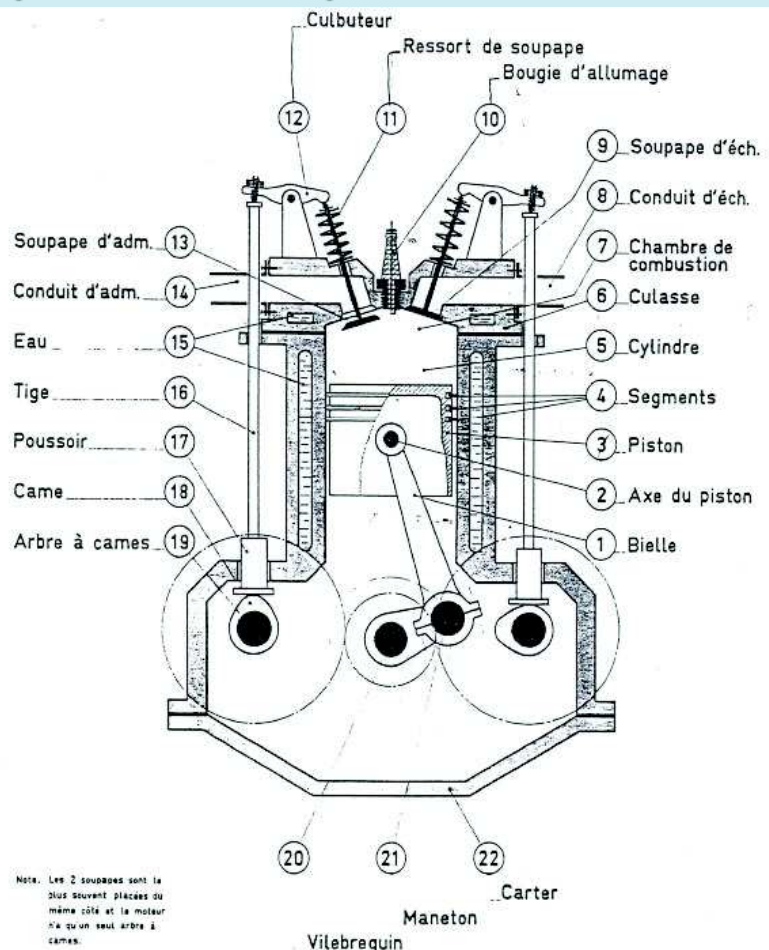
Lors du **deuxième temps**, le piston remonte vers le haut du cylindre. Les deux soupapes sont fermées et le **mélange carburé est comprimé.**

Explosion.

Lorsque le piston atteint le sommet du cylindre, une **étincelle** fournie par les bougies **allume le mélange** carburé dont la combustion se propage à vitesse contrôlée. La dilatation des gaz de combustion pousse le piston vers le bas. C'est le troisième temps.

Echappement

Juste avant la fin du troisième temps, la **soupape d'échappement** commence à s'ouvrir et **les gaz brûlés sont évacués** par le retour du piston vers le haut du cylindre. C'est le quatrième temps et le cycle est prêt à recommencer.



Les moteurs 4 temps sont souvent très vieux de conception... datant parfois des années trente on trouve majoritairement des versions avec soupapes latérales et tiges de culbuteurs !!!

4) Un cas à part : le moteur Diesel.

Les moteurs d'avion Diesels sont de nouveau à l'ordre du jour.

Premier avantage : ces moteurs sont **économés en carburant** par rapport à un moteur à essence.

Deuxième avantage : le **carburant diesel est très difficile à enflammer** ce qui réduit les risques lors d'un accident.

Troisième avantage : l'allumage du mélange explosif est déclenché par une forte compression... il n'y a donc **pas de bougies** ni d'étincelle ni de magnétos... *il peut y avoir des bougies de préchauffage mais ces objets ne sont utiles qu'au moment du démarrage.*



Le diesel... ce n'est pas nouveau car déjà en 1929 la France se dotait d'un diesel « aviation » : le Clerget 9 A alimenté à huile lourde pèse 228 kg et développe 110 ch à 1800 tours. (C'est un 9 cyl en étoile ci-contre).



Le diesel en club Le Diamond DA 40 D. La nouvelle génération, rapide économique et silencieux. Construit en composite fibre de verre / résine. Acquis neuf par l'aéroclub de l'Hérault en 2003 il représente l'évolution de l'aviation de loisir.

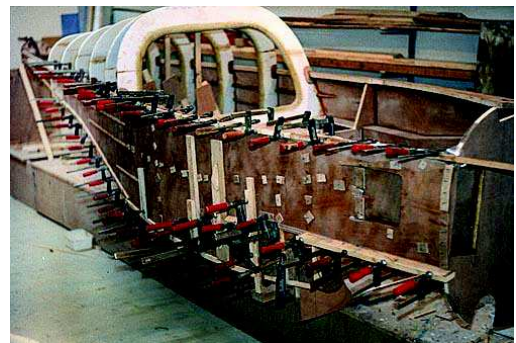


Son moteur Thielert Turbo-Diesel Common Rail de 135 CV fonctionne au JET A1. Il peut emporter 4 personnes à 129 kts (240 km/h). Son autonomie peut dépasser les 5 heures de vol selon les conditions d'utilisation. C'est un avion pour le voyage en VFR même la nuit (agrée VFR nuit).



On rencontre aussi ce moteur en **construction amateur** sur le Dieselis.

(ci-contre à droite en construction et à gauche en test moteur)



5) La propulsion électrique... des projets dans l'air du temps !



Un premier modèle d'avion léger (ULM) est agréé et commercialisable.

Depuis le 18 mai 1980 et le **Gossamer Penguin** plusieurs prototypes ont pu voler grâce à l'énergie Solaire et un moteur électrique.



Le prototype Hélios de la NASA.

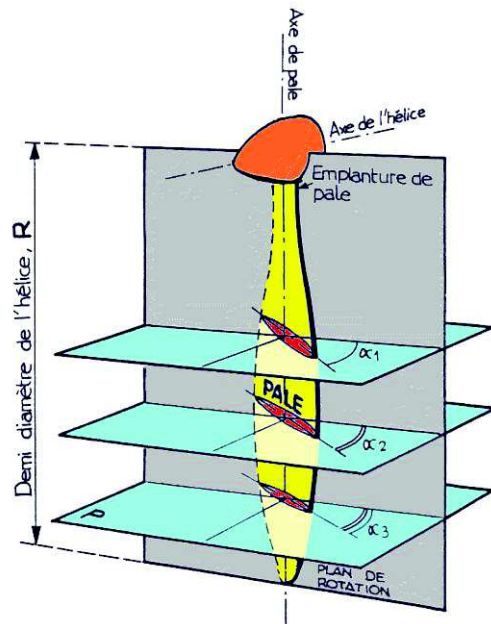


1) Description d'une hélice

Hélice est issu d'un mot grec helix signifiant « spirale ». L'hélice est un dispositif qui permet de transformer l'énergie mécanique fournie par le moteur en une force tractive ou propulsive directement utilisable par l'avion pour se déplacer.

L'hélice est constituée d'un **moyeu centré** sur l'axe de rotation protégé par un carénage appelé « **casserole** », sur lequel sont fixées des pales identiques (2, 3, 4 ou plus encore...) formant entre elles des angles égaux.

Chaque **pale** se présente sous la forme d'un **profil d'aile** dont la **corde de référence** fait un angle avec le plan de rotation. Cet angle est appelé **angle de calage**.

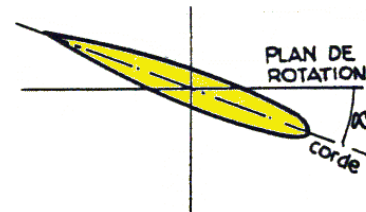


- Le pas de l'hélice.

On appelle **pas** la distance parcourue par l'hélice le long de son axe de rotation en un tour.

- Le calage.

On appelle **Calage** l'angle formé par la **corde** de l'un des profils et le **plan de rotation de l'hélice**. Il varie en fonction du rayon de rotation. Par convention on dira que le calage est celui du profil se situant à **70% du rayon maximum**. On dit que la pale est **vrillée**.



2) Fonctionnement :

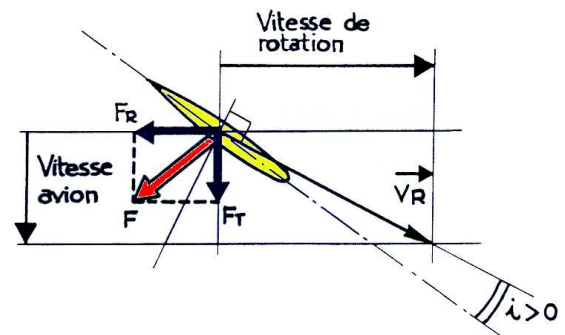
Le fonctionnement de l'hélice est tout à fait analogue à celui de l'aile de l'avion. Chaque pale est une juxtaposition de profils aérodynamiques dont les caractéristiques évoluent depuis le moyeu jusqu'à son extrémité.

Le vent relatif V_R issu :

- du déplacement de l'avion (Vitesse avion)
- de la rotation de l'hélice (Vitesse de rotation)

De même que pour l'aile, la valeur et l'orientation de la résultante aérodynamique dépendent de l'angle d'incidence. La force aérodynamique F se décompose :

- en une force utile : la traction F_T
- en une force nuisible : la traînée F_R



Dans un cas de vol stabilisé, la traction de l'hélice équilibre la traînée de l'avion, et l'ensemble des forces résistantes de chaque pale constitue un couple résistant qui équilibre le couple moteur.

3) Hélice à calage fixe

Si l'hélice n'est pas à calage variable son calage est choisi, une fois pour toutes au sol, comme le compromis permettant des performances acceptables dans les différents régimes de vol.

Avantages : La solution est techniquement peu coûteuse et procure une grande simplicité d'utilisation.

Inconvénients : Mauvais rendement de l'hélice dans certains cas de vol. Au cours des différentes phases de vol (décollage, croisière, atterrissage) la plage de vitesse d'un avion est grande, alors que celle de la vitesse de rotation de l'hélice est beaucoup plus étroite. Il en résulte que l'angle d'incidence hélice varie beaucoup, et donc le rendement.

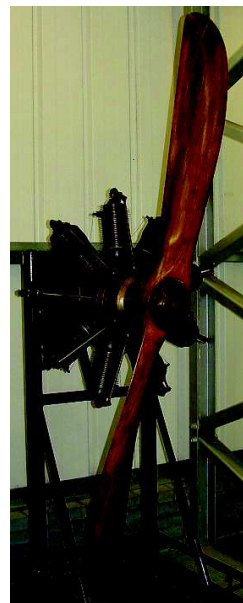
Une telle hélice ne peut donc offrir un rendement optimal pour toutes les phases de vol.

Mauvaise utilisation moteur : imaginez-vous au volant d'une Clio ou d'une 207 munie de sa seule quatrième vitesse. Vous aurez sûrement des problèmes au démarrage car vous allez demander au moteur un couple important avec un régime très faible (surcouple). Maintenant, imaginez-vous roulant avec cette même voiture munie de sa seule première vitesse. Il est clair que vous atteindrez vite une limite : le surrégime.

De même, sur un avion, une hélice à calage trop important entraînera un surcouple au décollage, et une hélice à calage trop faible, un surrégime en croisière.

La solution généralement adoptée par les constructeurs pour pallier ces deux inconvénients est de choisir une hélice à calage intermédiaire assurant une efficacité moyenne sur toute la plage d'utilisation.

Note : on appelle paramètres moteur, les informations concernant la conduite de ce dernier notamment le régime et la pression d'admission.



4) Hélice à calage variable (ou "pas variable") :

Un avion devant pouvoir évoluer sur une plage de vitesses assez étendue, il est nécessaire de faire varier l'angle de calage des pales de l'hélice afin de maintenir le régime moteur optimal. Dans ce cas, l'hélice est équipée d'un mécanisme permettant de modifier son calage en vol, et d'un système régulateur qui assure une vitesse de rotation constante (hélice dite à « vitesse constante ») à la valeur choisie par le pilote.



A chaque régime de vol correspondra donc un pas approprié.

- Décollage : petit pas.
- Croisière : pas plus grand et adapté au régime de vol.
- Incident ou vol à voile : drapeau.
- A l'atterrissage, après le poser des roues : revers.



Avantages

Bon rendement de l'hélice dans tous les cas de vol. Au cours des différentes phases de vol (décollage, croisière, atterrissage) grâce à la commande de pas d'hélice vous adapterez le calage de l'hélice à la vitesse de l'avion, afin de conserver l'angle d'incidence hélice optimal, et donc un rendement optimal.

Bonne utilisation moteur au décollage : permet au moteur de fournir immédiatement sa puissance maximale. Le régulateur d'hélice maintient automatiquement le régime affiché pendant toute la phase d'accélération ;

En croisière : permet au moteur de fournir une puissance adaptée à vos besoins (croisière économique par exemple).

Il existe dans le manuel de vol (partie performances) les préconisations du constructeur permettant une utilisation correcte du groupe moto-propulseur.