Étude des aéronefs et des engins spatiaux



Table des matières

1. Classification des aéronefs **5**
1.1. Introduction et généralités . . . 5
1.2. Aérostats . . . 5
1.3. Aérodynes . . . 5

2. Description générale des aérodynes **8**
2.1. Avion . . . 8
2.2. Hélicoptère . . . 9
2.3. Un exemple d'ULM : l'ULM pendulaire . . . 10

3. Cellule d'un aéronef **11**
3.1. Fuselage . . . 11
3.2. Voilure . . . 11
3.3. Empennage . . . 13
3.4. Atterrisseurs . . . 15

4. Les commandes et gouvernes **18**
4.1. Les trois axes de l'avion . . . 18
4.2. Les commandes et gouvernes primaires . . . 18
4.3. Les commandes et gouvernes secondaires . . . 20

5. Structures et matériaux **22**
5.1. Généralités . . . 22
5.2. Matériaux de construction . . . 24
5.3. Principes de construction . . . 25

6. Groupe motopropulseur **27**
6.1. Motorisation à pistons . . . 27
6.2. Hélice . . . 29
6.3. Turbomachines . . . 31
6.4. Autres motorisations . . . 32

7. Instruments de bord **33**
7.1. L'altimètre . . . 34
7.2. Le variomètre . . . 35
7.3. L'anémomètre . . . 36
7.4. L'horizon artificiel . . . 37
7.5. L'indicateur de virage et de dérapage . . . 38
7.6. Le compas ou l'indicateur de direction . . . 39
7.7. Cas des avions avec instrumentation digitale . . . 40

8. Engins spatiaux **41**
8.1. Description d'une fusée . . . 41
8.2. Propulsion d'une fusée . . . 43
8.3. Satellites et sondes . . . 44

1. Classification des aéronefs

Dans ce chapitre, les grandes familles d'aéronefs seront abordées sans entrer dans une description de tous les types d'aéronefs.

1.1. Introduction et généralités

Un _____ est un moyen de transport capable de s'élever et d'évoluer au sein de l'atmosphère terrestre. On peut distinguer deux grandes familles d'aéronefs :

- les _____ « plus lourds que l'air » dont le maintien en vol est assuré par une voilure (fixe ou tournante) ;
- les _____ « plus légers que l'air » dont le maintien en vol est assuré par une force exercée par l'atmosphère (la poussée d'Archimède).

Le maintien en vol d'un aéronef est appelé _____.

Remarque : *La classification des aéronefs n'est pas nécessairement figée dans le temps. Les drones et les Ultra-Légers-Motorisés sont par exemple plus difficiles à classer.*

1.2. Aérostats

On peut séparer les aérostats en deux grandes catégories :

- les _____ parfois plus communément appelés **montgolfières** du nom de leurs inventeurs : les frères de Montgolfier et dont les pilotes sont des aérostiers ;
- les _____ composés d'un ballon et comportant un système de propulsion



(a) Ballon à air chaud



(b) Ballon captif



(c) Ballon à gaz



(d) Dirigeable

Figure 1 – Aérostats

Le ballon à air chaud utilise la poussée d'Archimède pour se maintenir en vol mais son déplacement horizontal dépend du vent. À volume égal, l'air chaud est plus léger que l'air froid (on dit que la masse volumique est plus faible). Ainsi, l'air dans lequel est baigné le ballon exerce une force qui va pousser le ballon vers le haut. Pour réguler son altitude, l'aérostier fait fonctionner le brûleur pour chauffer l'air et monter ou laisse échapper de l'air chaud par la couronne située en haut du ballon pour descendre.

1.3. Aérodynes

On distingue trois grandes familles d'aérodynes qui dépendent de leur **voilure**, c'est-à-dire des surfaces qui portent l'aérodyne. Ces trois familles sont :



Figure 2 – Détails d'un ballon à air chaud

- les aérodynes à _____ regroupant les **avions** (dont le nom date de Clément Ader à la fin du XIXe siècle), les planeurs, certains ULM notamment ;
- les aérodynes à _____ regroupant les paramoteurs (qui font partie des ULM) ;
- les aérodynes à _____ regroupant les hélicoptères, les autogires notamment.

Les aérodynes motorisés regroupent une large gamme d'aéronefs. Si les avions requièrent un environnement généralement dégagé pour décoller et atterrir (pouvant aller de 400 m à près 4000 m néanmoins), les ULM pendulaires peuvent décoller en une centaine de mètres.

Remarque : *Les drones, en évolution constante actuellement peuvent appartenir à n'importe laquelle de ces catégories. Ce sont des engins sans équipage mais, à la différence des modèles réduits, ils ont été conçus spécifiquement et ne sont pas une imitation d'un modèle d'aéronef de plus grande taille.*



(a) Avion à hélices



(b) Avion à réaction



(c) Modèle réduit



(d) Hélicoptère



(e) ULM (multiaxes)



(f) Motoplaneur

Figure 3 – Aérodynes motorisés

Remarque : *Si l'ULM multiaxes ressemble fortement à un avion à hélice de petite taille, il s'en distingue par son poids : celui-ci est limité pour appartenir à la catégorie ULM. De plus, un ULM n'est pas un* ***aéronef certifié*** *c'est-à-dire que les lois qui l'autorisent à voler sont moins contraignantes que pour un avion, un planeur ou un hélicoptère par exemple (inspection régulière par des mécaniciens ou par les services de l'État).*



(a) Parachute



(b) Cerf-volant



(c) Modèle réduit



(d) Parapente



(e) Deltaplane



(f) Planeur

Figure 4 – Aérodynes non motorisés

Les aéronefs motorisés possèdent un groupe motopropulseur (en abrégé GMP) qui sera étudié dans le cadre du BIA. En revanche, les aéronefs non motorisés ont généralement besoin d'une source d'énergie au départ pour être mis en mouvement, qu'il s'agisse d'un avion par exemple pour le planeur ou du mouvement initié par le pilote dans un parapente.

2. Description générale des aérodynes

Nous n'aborderons pas la description des éléments constitutifs de tous les aérodynes mais seulement sur une large gamme d'entre eux.

2.1. Avion

Un avion peut, d'une manière générale, être décomposé en cinq parties distinctes :

- la _____ regroupant le fuselage, les ailes (ou **voilure**), les empennages (horizontal et vertical), les trains d'atterrissage ;
- le _____ qui regroupe l'ensemble des éléments qui permet à l'avion de se propulser comme par exemple l'hélice et le moteur à pistons pour un avion léger ou les réacteurs pour un avion lourd ;
- les _____ qui sont des dispositifs mobiles, permettent de produire ou de contrôler les mouvements d'un aérodyne autour de son centre de gravité ;
- les _____ qui permettent d'agir sur les gouvernes et de contrôler ainsi la trajectoire de l'avion ;
- l'_____ qui est l'ensemble des équipements électroniques, électriques et informatiques qui aident au pilotage des aéronefs.

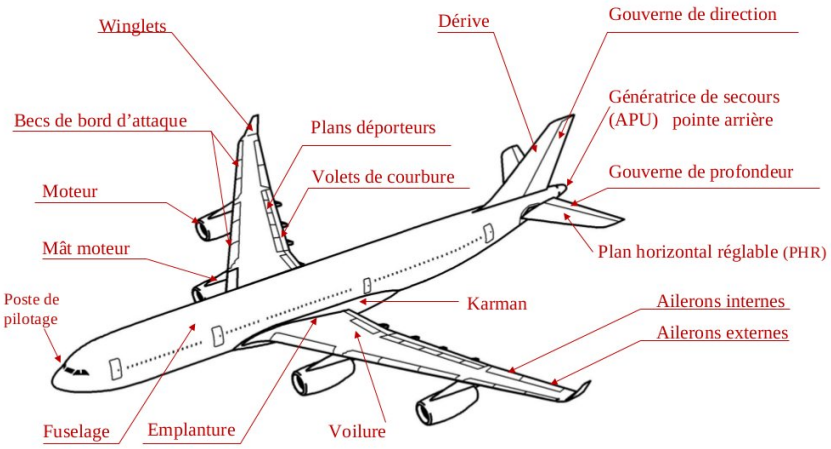


Figure 5 – Description d'un avion lourd

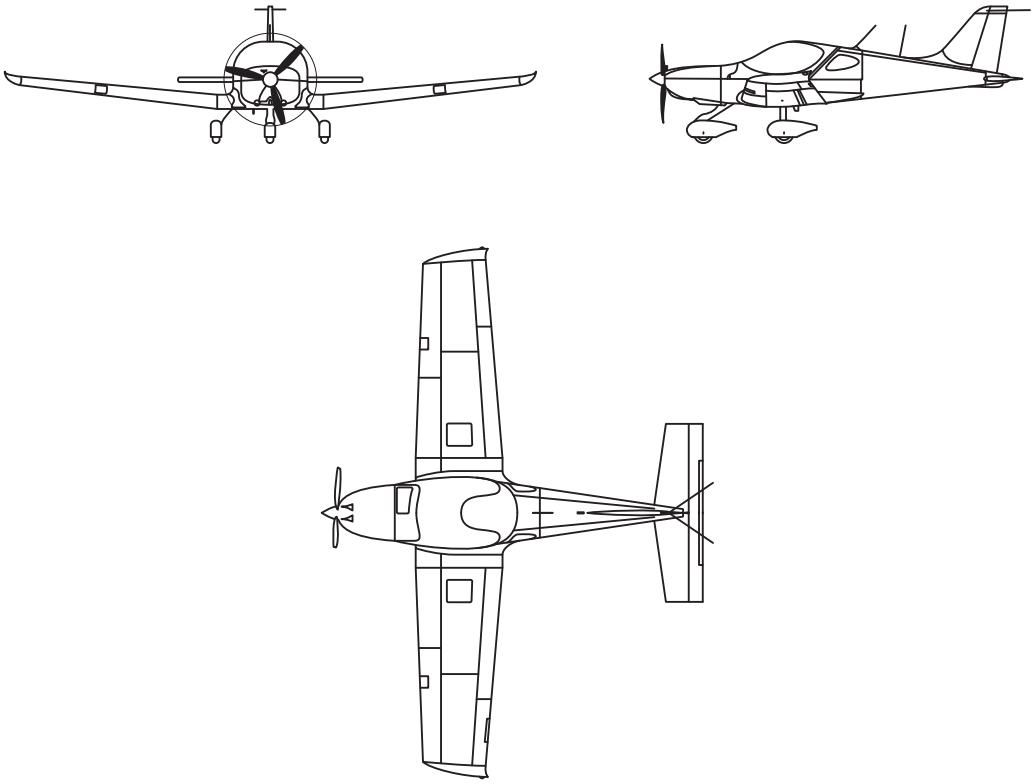


Figure 6 – Description d'un avion léger

2.2. Hélicoptère

Un certain nombre d'éléments sont communs avec un avion la principale différence provenant de la voilure tournante. On se contente ici d'un dessin descriptif :

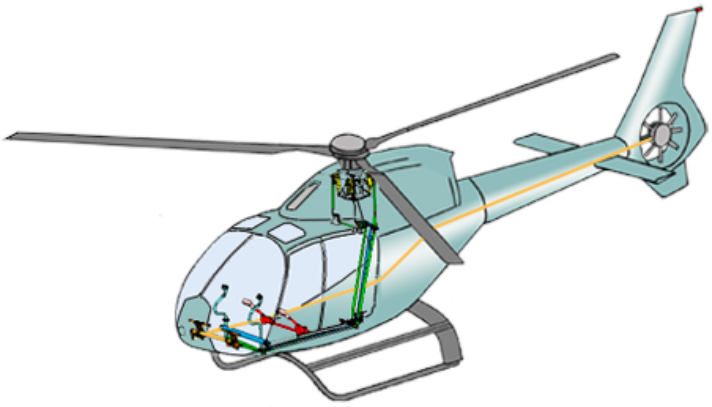


Figure 7 – Description d'un hélicoptère

2.3. Un exemple d'ULM : l'ULM pendulaire

Un ULM pendulaire est un aérodyne sustenté par une voilure rigide sous laquelle est généralement accroché un chariot motorisé. Sa motorisation est limité en puissance ainsi qu'en masse.

Les manœuvres s'effectuent en déplaçant le poids du pendule constitué du chariot et du corps du pilote, par rapport à l'aile.

Le pilote tient la base du triangle (appelé « trapèze »), soit la barre de contrôle, qui se situe approximativement à une vingtaine de centimètres devant lui en vol stabilisé en palier, à hauteur de la poitrine. Un déplacement latéral du pendule incline l'aile dans sa direction et occasionne donc un virage dans cette direction.

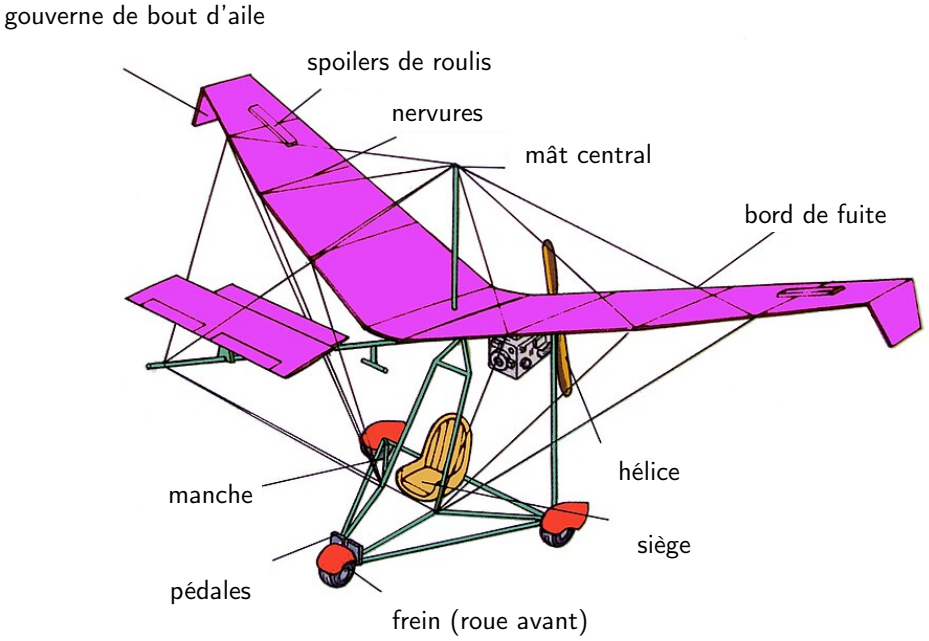


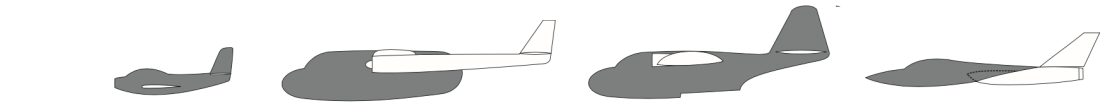
Figure 8 – Description d'un ULM pendulaire

3. Cellule d'un aéronef

Cette partie considérera essentiellement la cellule d'un avion, d'un planeur ou d'un ULM multiaxes voire d'un hélicoptère.

3.1. Fuselage

Le fuselage est conçu essentiellement pour supporter le poids du groupe motopropulseur et des personnes à bord, relier les ailes et l'empennage. Il tire son nom de sa forme en _____ et ses dimension et caractéristiques ont évolué au fil du temps pour permettre une utilisation pour du transport massif de passagers, de fret ou pour des missions militaires.



Avion de tourisme | Transport de passagers | Fret | Chasseur militaire

Figure 9 – Exemples de fuselages

3.2. Voilure

La voilure est la surface assurant la portance d'un aérodyne grâce à son mouvement. Dans le cas d'un appareil à **voilure fixe** (avion ou planeur par exemple) il s'agit de l'aile, par opposition à un appareil à **voilure tournante** (hélicoptère ou autogire par exemple), où il s'agit d'un rotor. Sur un avion, la voilure peut être haute, médiane ou basse :



(a) Ailes hautes | **(b)** Ailes médianes | **(c)** Ailes basses

Figure 10 – Position des ailes sur un avion

Le choix dépend de l'utilisation de l'aéronef et sera revu lors de l'étude des matériaux de construction.

La forme des ailes est assez diversifiée comme en atteste la figure suivante :



(a) Flèche



(b) Flèche



(c) Rectangulaire



(d) Elliptique



(e) Delta



(f) Gothique

Figure 11 – Forme des ailes

La forme de l'aile est un compromis entre stabilité et maniabilité de l'aérodyne et peut se résumer ainsi :

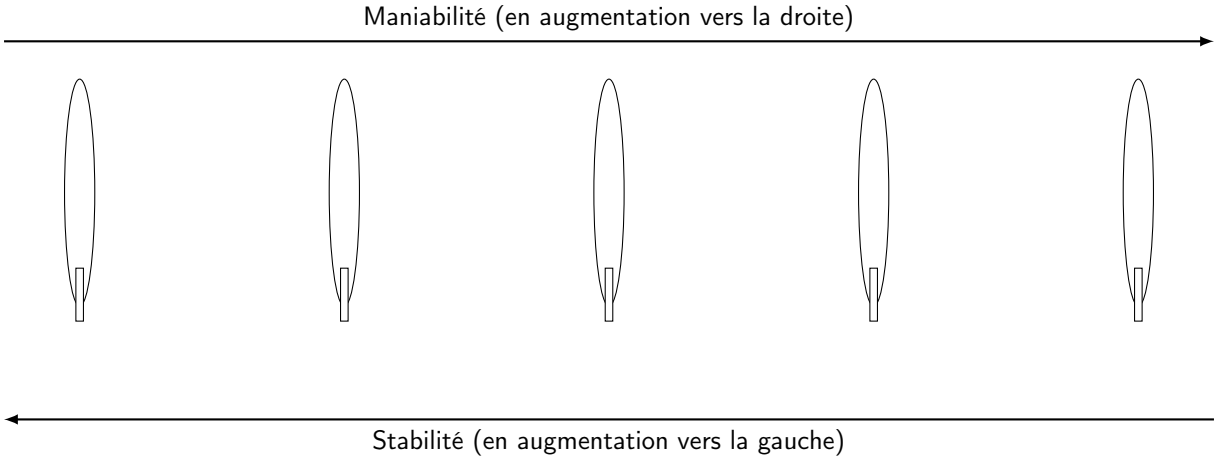
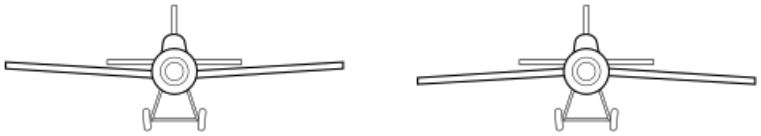


Figure 12 – Stabilité et maniabilité selon la forme des ailes

La voilure n'est pas nécessairement « perpendiculaire » au fuselage de l'avion et on peut considérer l'angle entre les ailes et le fuselage, appelé le _____. Ceci a un effet sur la stabilité du vol.



(a) Dièdre positif **(b)** Dièdre négatif

Figure 13 – Dièdre

Une aile d'avion classique est constituée d'une **emplanture** qui assure la jonction avec le fuselage via le **karman** qui permet d'améliorer l'écoulement de l'air à cette jonction. Le **saumon** se trouve en bout d'aile à l'opposé du fuselage, l'**extrados** étant la partie supérieure, l'**intrados**, la partie inférieure, le **bord d'attaque** la partie avant et le **bord de fuite** la partie arrière.

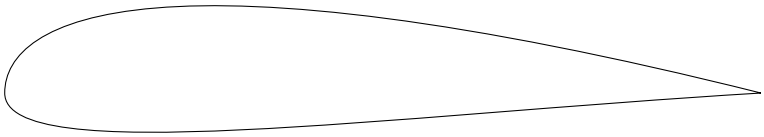


Figure 14 – Coupe d'une aile

3.3. Empennage

L'**empennage** est un ensemble de plans fixes et mobiles qui assurent la stabilité de l'aéronef dans le plan vertical (**axe de lacet**) et dans le plan horizontal (**axe de tangage**). Généralement, l'empennage se compose de deux parties, l'une horizontale et l'autre verticale — appelée **dérive** — dédiées à la stabilité sur les axes précédents.

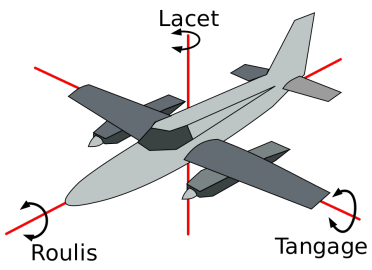


Figure 15 – Axes d'un avion

Observons à nouveau différents empennages d'avions :



(a) Multi-dérives



(b) Classique



(c) Cruciforme



(d) En V



(e) En T



(f) Plan canard

Figure 16 – Différents empennages

Remarque : *Le plan canard se distingue des autres cas car celui-ci est composé d'une partie située à l'avant de l'avion.*

Les différentes surfaces de l'empennage comportent aussi des parties mobiles pour modifier volontairement l'équilibre : en lacet, la gouverne de direction pour le contrôle du virage, et l'équilibre en tangage, la gouverne de profondeur pour le contrôle de la montée ou de la descente. Ceci est étudié dans la partie sur les commandes de vol.

Sur un hélicoptère, l'empennage est très différent car une partie du groupe motopropulseur participe à la stabilité de l'aéronef.



Figure 17 – Empennage d'un hélicoptère

3.4. Atterrisseurs

On regroupe sous le terme **atterrisseur** l'ensemble des dispositifs permettant à l'aéronef de se poser et/ou de se déplacer sur le sol. l'atterrisseur est généralement monté sur des dispositifs **amortisseurs** destinés à absorber l'impact au moment de l'atterrissage. Il existe différents types d'atterrisseurs prévus pour différentes utilisations et différentes surfaces :

- des _____ sont utilisées dans la plupart des cas et permettent la plus grande polyvalence ;
- des _____ sont utilisés sur les aéronefs amphibie (hydravion ou hélicoptère amphibie) ;
- des _____, ne permettant pas de déplacement au sol et donc généralement réservés pour les hélicoptères pouvant décoller verticalement ;
- des _____ sont utilisés pour permettre l'atterrissage sur des surfaces enneigées.



(a) Atterrisseur à roues



(b) Atterr. à flotteurs



(c) Atterrisseur à patins



(d) Atterrisseur à skis

Figure 18 – Les différents types d'atterrisseurs

Les atterrisseurs peuvent être _____ ou _____. Dans le premier cas, l'atterrisseur est toujours présent tandis que dans le second, il est possible de rétracter l'atterrisseur et de le ranger dans le fuselage. Ceci permet alors d'améliorer les performances de l'aéronef. Les atterrisseurs escamotables sont généralement à roues.



Figure 19 – Les coffres de roues apparaissent clairement sous le fuselage

Pour les trains d'atterrissage à roues, on décompose l'atterrisseur en deux ensembles :

- le _____, proche du centre de gravité de l'avion et supportant la majorité de la masse de l'avion ;
- le _____, permettant d'équilibrer l'avion au sol et éventuellement de diriger l'avion lors de ses déplacements au sol.

Il existe deux configurations différentes pour les trains d'atterrissages à roues :

- la configuration _____, dans laquelle le train auxiliaire est placé à l'avant de l'avion. On parle alors de _____ ;
- la configuration _____, dans laquelle le train auxiliaire est placé à l'arrière de l'avion. On parle alors de _____.



(a) Train tricycle **(b)** Train classique

Figure 20 – Les deux types de trains d'atterrissages à roues

L'ensemble du train d'atterrissage est caractérisé par deux éléments :
- sa voie, correspondant à la distance maximale séparant les roues du train principal ;
- son empattement, correspondant à la distance maximale séparant les roues du train principal de celles du train auxiliaire.

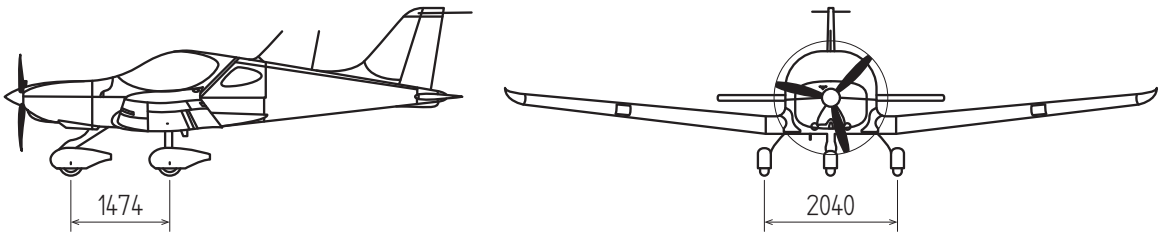


Figure 21 – Empattement et voie d'un train d'atterrissage

Dans certains cas de figures rares, généralement pour les planeurs et dans un souci d'économie de masse, le train principal ne comporte qu'une seule roue. On parle alors de train d'atterrissage monotrace.



Figure 22 – Atterrisseur monotrace sur planeur

Selon la masse de l'avion et sa répartition sur les différentes roues du train d'atterrissage, on pourra trouver des trains d'atterrissage à roue simple, à roues en diabolo ou à boggie.



(a) Roue simple



(b) Roues en diabolo



(c) Boggies

Figure 23 – Les différentes associations de roues

4. Les commandes et gouvernes

Le comportement de l'avion dans l'air est modifié par le déplacement de parties mobiles situées en différents endroits de la cellule. Ces parties mobiles, appelées **gouvernes**, sont contrôlées par le pilote à l'aide de **commandes**.

On distingue deux types de commandes et gouvernes :

- les commandes et gouvernes **primaires**, qui permettent d'agir directement sur l'attitude de l'avion (son orientation dans l'air) ;
- les commandes et gouvernes **secondaires**, qui modifient les profils d'aile de manière a aider le pilote dans ses actions ou à modifier la sustentation de l'avion.

Remarque : *Les éléments dont nous parlerons dans cette partie sons plus spécifiquement adaptés aux avions, planeurs et ULM multiaxes. Pour les autres aéronefs (hélicoptère, parachute, deltaplane, ULM mendulaire, etc.) le pilotage est se fait différemment (potentiellement de manière complexe), et nous ne présenterons pas dans le cadre de ce cours les commandes et gouvernes pour de tels appareils.*

4.1. Les trois axes de l'avion

Aux commandes d'un aéronef évoluant dans l'atmosphère, il faut pouvoir orienter son appareil autour de trois directions pour le diriger dans l'espace. On définit pour cela trois axes présentés ci-après.

- L'axe de _____ est l'axe longitudinal de l'avion. On mesure autour de cet axe l'**inclinaison** de l'avion.
- L'axe de _____ est l'axe « matérialisé par les ailes de l'avion ». On mesure autour de cet axe l'**assiette** de l'avion.
- L'axe de _____ est l'axe perpendiculaire au plan des ailes. *L'angle de lacet, bien qu'important pour le pilotage, n'est pas mesuré de manière quantitative ni nommé spécifiquement.*

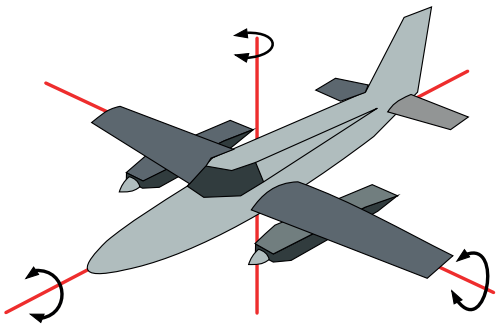


Figure 24 – Les trois axes d'un avion

4.2. Les commandes et gouvernes primaires

Les commandes et gouvernes primaires sont celles qui vont permettre au pilote de contrôler l'orientation de l'avion autour des trois axes vus précédemment. Nous expliquerons dans le chapitre d'aérodynamique la relation entre la position des gouvernes et les mouvements de l'avion, nous nous contenterons ici de décrire ces mouvements.

- La _____ permet le contrôle de l'avion selon l'axe de tangage. Elle est située sur l'empennage horizontal et se commande à l'aide du volant ou du manche en lui appliquant un mouvement d'avant en arrière.

- Les _____ permettent le contrôle de l'avion selon l'axe de roulis. Ils sont situés aux extrémités des ailes et se commandent à l'aide du volant ou du manche en lui appliquant un mouvement de gauche à droite.

- La _____ permet le contrôle de l'avion selon l'axe de lacet. Elle est située sur l'empennage vertical et se commande à l'aide des palonniers en appuyant sur la pédale de gauche ou la pédale de droite.

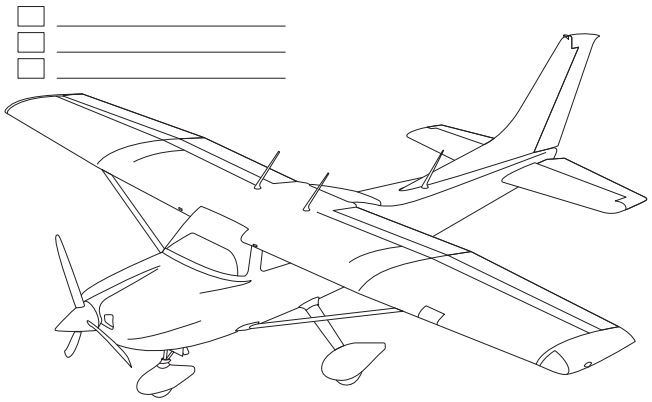


Figure 25 – Les gouvernes

D'une manière générale, on pourra retenir que « la commande attire la gouverne ».

- Pour la gouverne de profondeur :

  - le braquage du manche _____ commande la gouverne de profondeur _____ _____, ce qui entraine une modification de l'assiette à piquer (le nez de l'avion descend) ;

  - le braquage du manche _____ commande la gouverne de profondeur _____, ce qui entraine une modification de l'assiette à cabrer (le nez de l'avion monte).

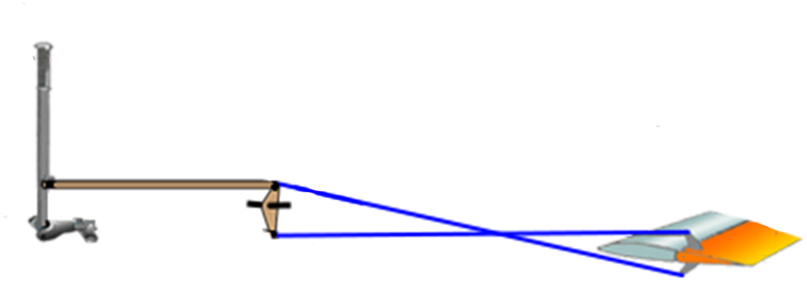


Figure 26 – Fonctionnement de la gouverne de profondeur

- Pour les ailerons :
  - le braquage du manche _____ commande l'aileron de gauche _____ _____ et l'aileron de droite _____, ce qui entraine une modification de l'inclinaison vers la gauche (l'avion engage un virage à gauche) ;
  - le braquage du manche _____ commande l'aileron de droite _____ _____ et l'aileron de gauche _____, ce qui entraine une modification de l'inclinaison vers la droite (l'avion engage un virage à droite).

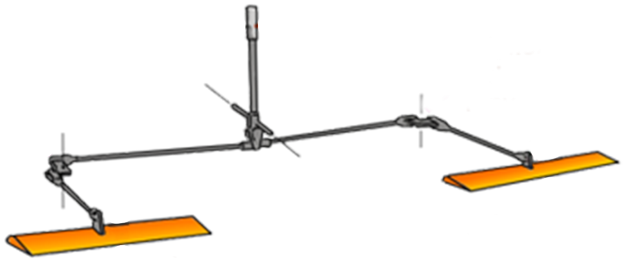


Figure 27 – Fonctionnement des ailerons

- Pour la gouverne de direction :
  - l'enfoncement de la pédale _____ commande la gouverne de direction _____ _____, ce qui entraine une modification de l'angle de lacet vers la gauche (le nez de l'avion part vers la gauche) ;
  - l'enfoncement de la pédale _____ commande la gouverne de direction _____ _____, ce qui entraine une modification de l'angle de lacet vers la droite (le nez de l'avion part vers la droite).



Figure 28 – Fonctionnement de la gouverne de direction

Bien que ce ne soit pas systématique, il est courant que les palonniers dirigent également le train auxiliaire de manière à permettre le guidage de l'avion lors des phases de roulage au sol. Dans ce cas, le fonctionnement est similaire à ce que l'on a vu plus haut :

- l'enfoncement de la pédale _____ commande le train auxiliaire _____ _____, ce qui entraine l'avion dans un virage à gauche ;
- l'enfoncement de la pédale _____ commande le train auxiliaire _____ _____, ce qui entraine l'avion dans un virage à droite.

4.3. Les commandes et gouvernes secondaires

On peut identifier deux types de commandes et gouvernes secondaires :

- celles qui vont aider le pilote à manœuvrer les commandes et gouvernes principales ;

- celles qui vont modifier la sustentation de l'avion.

Les commandes et gouvernes d'assistance

Lors d'une montée prolongée par exemple, il est nécessaire de maintenir constamment le manche en arrière afin de conserver le nez de l'avion vers le haut. Ceci peut être fatigant pour le pilote et on utilise pour cela une gouverne secondaire que l'on appelle un **compensateur**.

Puisqu'il est possible de contrôler les rotations de l'avion autour de trois axes, on peut imaginer des compensateurs aidant le pilote à manœuvrer autour de ces trois axes.

Dans la mesure ou un avion est couramment amené à réaliser des montées ou des descentes prolongées, la plupart des avions sont équipés d'un compensateur de profondeur, aidant le pilote à maintenir l'avion en montée ou en descente. En revanche, seuls les avions plus performants sont équipés des autres compensateurs. Le compensateur de lacet peut être présent sur des avions dont la motorisation est puissante et est obligatoire sur les avions multimoteurs. Les compensateurs de roulis ne sont généralement installés que sur les avions de ligne.



Figure 29 – Les compensateurs de profondeur et de direction

Les commandes et gouvernes hyper et hyposustentatrices

Nous verrons dans le chapitre d'aérodynamique que la portance d'une voilure est principalement liée à sa vitesse de déplacement dans l'air. Ainsi, pour les phases de vol durant lesquelles la vitesse de l'avion est relativement faible, il est nécessaire de disposer d'un moyen d'augmenter artificiellement la portance de l'aile. Deux dispositifs peuvent être utilisés pour cela :

- les _____, situés sur le bord de fuite de l'aile
- les _____, situés sur le bord d'attaque de l'aile

Ces deux dispositifs ont pour effet d'augmenter la surface de l'aile et/ou d'augmenter sa courbure.

Remarque : *Il existe de nombreux types de volets et de becs reposant sur des systèmes mécaniques plus ou moins complexes et offrant des performances plus ou moins bonnes. Nous ne rentrerons pas ici dans le détail de toutes les solutions.*

À l'inverse, lorsque l'on souhaite casser la portance d'une aile, on peut utiliser des dispositifs ayant l'effet inverse. De tels dispositifs hyposustentateurs sont généralement utilisés sur les avions de ligne et sur les planeurs.



(a) Becs



(b) Volets

Figure 30 – Les dispositifs hypersustentateurs sur un avion de ligne



(a) Aérofreins sur planeur



(b) Volets spoilers sur avion de ligne

Figure 31 – Les dispositifs hyposustentateurs

5. Structures et matériaux

5.1. Généralités

L'étude de la structure et des matériaux qui composent un aéronef est directement liée aux _____ qui s'y exercent. Sans entrer dans une définition complexe, une force modélise, en physique, une action mécanique exercée sur un objet ou une partie d'un objet par un autre objet ou partie d'objet. L'ensemble des forces appliquées à un objet a pour effet de lui communiquer une accélération ou de le déformer.

On « dessine » généralement les forces par des flèches (ce sera le cas dans les illustrations de cette partie). Pour une force donnée, la flèche a :

- une _____ : l'orientation de la force ;
- un _____ : vers quelle direction la force agit ;
- une _____ (ou norme) : l'intensité de la force ;
- un _____ : le point d'application c'est-à-dire l'endroit où la force s'applique.

L'intérêt de cette représentation est de pouvoir ajouter facilement les forces : on dessine les flèches les unes derrières les autres et on a la force totale qui s'exerce sur l'objet considéré :

Remarque : *On parle en réalité de vecteur qui est représenté par une flèche. Cette notion sera vue au lycée et est inhérente à la représentation de force. Dans l'enseignement supérieur scientifique, les espaces de vecteurs (ou espaces*

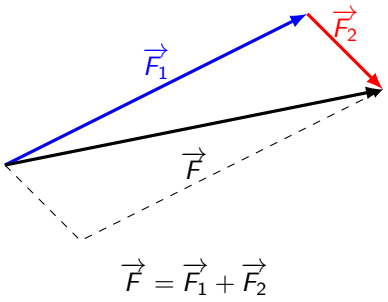


Figure 32 – Parallélogramme des forces

vectoriels) jouent un rôle très important dans la compréhension de phénomènes physiques.

Les principales forces qui s'exercent sur un aéronefs sont :

- le _____ de l'aéronef (qui est la somme des poids des différents éléments de celui-ci) ;
- la _____ de la voilure ;
- la_____ provenant du frottement de l'air sur l'ensemble de l'aéronef ;
- la _____ exercée par le groupe motopropulseur.

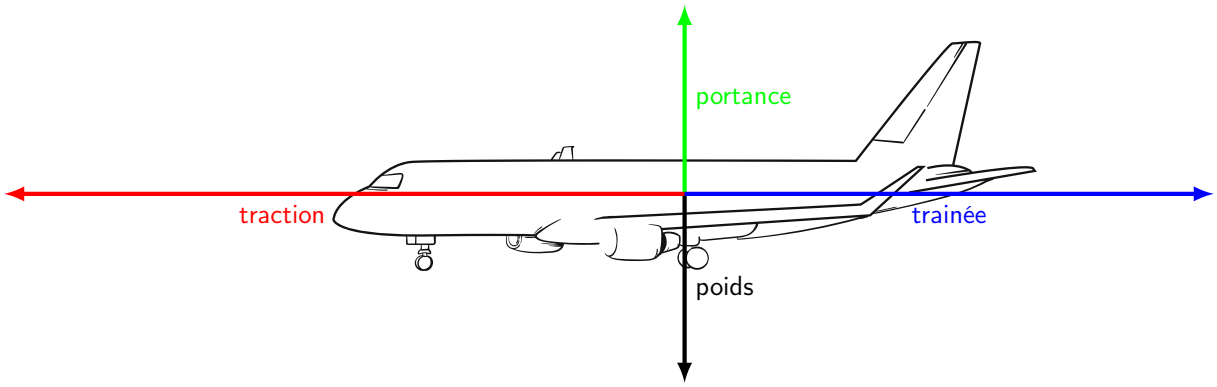


Figure 33 – Forces s'exerçant sur un avion

Ces différentes forces nécessitent des choix quant aux matériaux qui constituent les aéronefs : compromis entre poids et résistance, prise en compte des _____ qui s'exercent sur toute la structure, possibilité de lier les différentes pièces entre elles notamment.

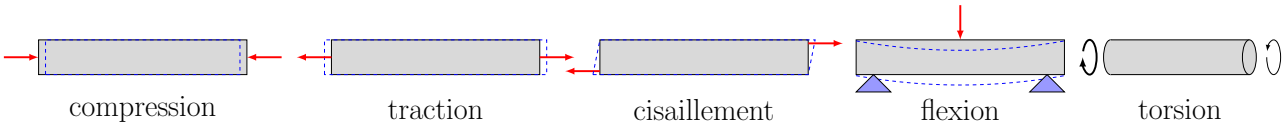


Figure 34 – Contraintes sur un matériau

Les contraintes dépendent de la surface sur laquelle s'exerce une force d'intensité F donnée : plus la surface S est grande, moins la contrainte σ est importante. De façon précise, la formule qui lie ces données est la suivante : $\sigma = F/S$. Ces contraintes peuvent s'ajouter les unes aux autres.

5.2. Matériaux de construction

Les principaux matériaux sont le bois et la toile, les métaux, les résines, les tissus de fibres et les composites. On peut résumer leurs avantages et inconvénients dans le tableau suivant :

Nom	**Précisions**	**Pièces**	**Avantages**	Inconvénients
Bois				
Toile				
Résines				
Métaux				
Fibres				
Composites				

La présentation du tableau est assez chronologique par rapport à l'histoire de l'aviation : plus la ligne est basse, plus le matériau est récent.

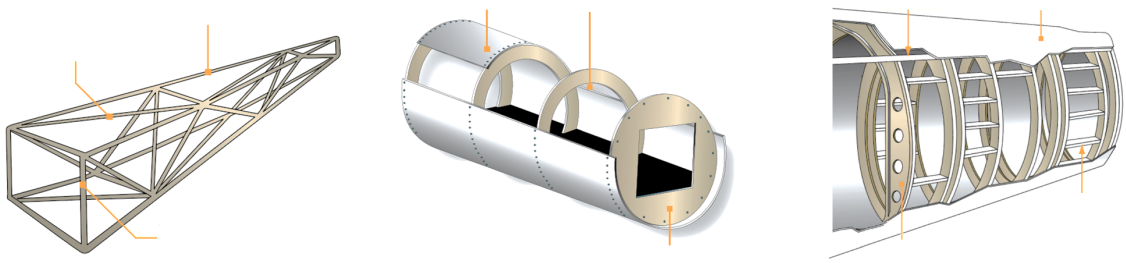
5.3. Principes de construction

De façon générale, le rapport entre la masse et la résistance des matériaux qui composent un aéronef est au cœur des préoccupations lors de la conception d'un tel objet. Élever un aéronef léger sera plus simple mais pourra-t-il être suffisamment résistant pour l'ensemble des mouvements ?

5.3.1. Fuselage

Les fuselages sont conçus selon trois types de structures générales :

- les structures en _____ constituées de traverses et de longerons voire de câbles sur lesquelles est attaché un revêtement souple ne participant pas à la résistance du fuselage (on dit que le revêtement est non travaillant) ;
- les structures _____ pour lesquelles le revêtement est attaché (par des vis ou des rivets) à des cadres participants à l'absorption des efforts et à la résistance du fuselage (on dit que le revêtement est travaillant) ;
- les structures _____ mixte entre les deux structures.



(a) Treillis **(b)** Monocoque **(c)** Semi-monocoque

Figure 35 – Types de fuselages

5.3.2. Voilure et empennage

On retrouve le même type de structure adapté à la forme des voilures et des empennages comme sur l'aile suivante :

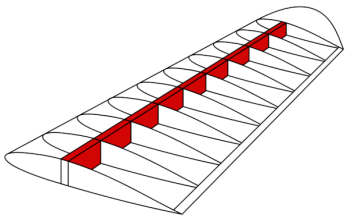


Figure 36 – Vue interne d'une aile

Les contraintes sur une aile sont nombreuses : la **portance** a tendance à créer une flexion du longeron vers le haut imposant une compression à l'extrados et une traction à l'intrados.

Les **nervures** peuvent être des tôles percées, ou des structures en treillis permettant notamment le passage des réservoirs de carburant.

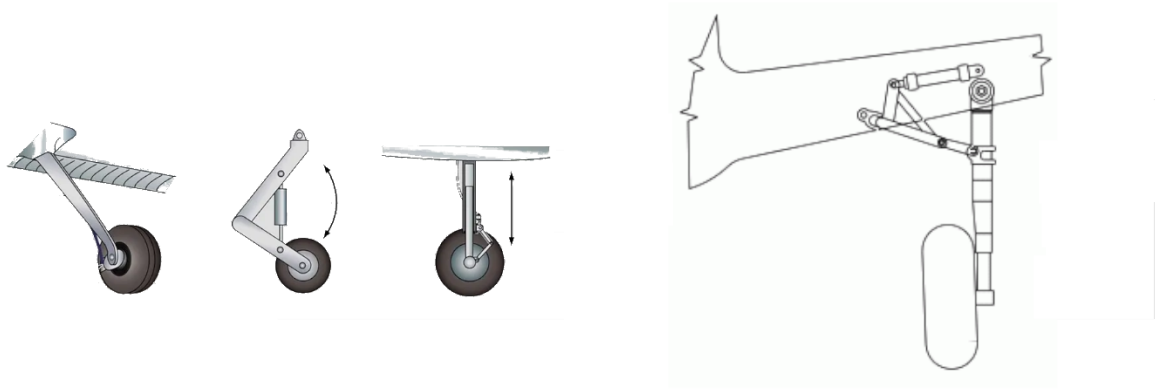
Remarque : *Les parties mobiles (ailerons, gouvernes, compensateurs) sont de nature analogue aux structures de cette partie.*

5.3.3. Atterrisseurs

Les atterrisseurs, quel que soit leur type, doivent supporter le poids de l'avion dans les différentes phases du vol (le roulage notamment) mais également absorber la majeure partie du choc lors de l'atterrissage : ils _____ _____ celui-ci. L'amortissement peut provenir directement du matériau utilisé ou être un élément à part entière. Les systèmes de freinage, intégrés à ceux-ci sont primordiaux pour arrêter la course de l'aéronef une fois les roues au sol. Les aéronefs performants possèdent des trains rentrants pour diminuer la trainée.

L'amortisseur le plus courant est _____ : composé d'une cavité contenant généralement de l'huile, l'écoulement plus lent de celle-ci permet d'amortir le choc.

Nous présentons ici certains systèmes des atterrisseurs à roues :



(a) Types de trains **(b)** Train rentrant

Figure 37 – Conception des trains d'atterrissage

Les freins sont généralement à friction : un disque métallique solidaire des roues est pincé entre deux pièces pour freiner. Le freinage peut être une phase délicate car il suppose que les roues adhérent au sol. S'il reste de la portance à l'atterrissage, qui peut être liée à une vitesse trop importante, l'avion n'a pas un contact suffisamment important avec la piste pour freiner. L'annulation de la portance est fondamentale pour que les systèmes de freinage demeurent efficaces.

6. Groupe motopropulseur

Le groupe motopropulseur comprend l'ensemble des éléments permettant la mise en mouvement d'un aérodyne selon différents circuits comme :

- le circuit _____ assurant la circulation de la source d'énergie vers le moteur ;
- le circuit _____ qui permet le fonctionnement de certains éléments de motorisation ;
- le circuit _____ qui transforme le carburant en un travail prêt à être transmis au système de propulsion ;
- le circuit _____ qui permet le mouvement de pièces (notamment tournantes) en minimisant les frottements ;
- le circuit _____ qui assure une température optimale du moteur en évitant notamment une usure prématurée ;
- le circuit _____ qui transmet le mouvement assuré par le moteur vers les systèmes propulsifs ;
- le circuit _____ qui peut être constitué d'une simple hélice ou de l'éjection de gaz voire de rotors.

Dans la suite, on abordera seulement certains éléments des circuits précédents.

6.1. Motorisation à pistons

La plupart des moteurs à pistons sont généralement de moteurs à quatre temps. Pour pouvoir fonctionner, les moteurs quatre temps comportent un certain nombre d'éléments différents, notamment :

- les **soupapes** d'admission et d'échappement, des obturateurs mobiles ;
- les **bougies** d'allumage, qui initient la combustion en enflammant le mélange d'air et de carburant ;
- les **pistons**, qui compriment les gaz avant la combustion puis qui transforment la force de celle-ci en un mouvement ;
- les **bielles**, qui sont rattachées aux pistons à une extrémité et au vilebrequin de l'autre, transformant le mouvement linéaire du piston en un mouvement rotatif ;
- le **vilebrequin**, qui permet de distribuer entre les différents cylindres chacun des temps du moteur et de transmettre le mouvement au système de propulsion (par exemple une hélice) ;
- la **chambre de combustion**, l'espace hermétique où le mélange d'air et de carburant est comprimé avant de s'enflammer.

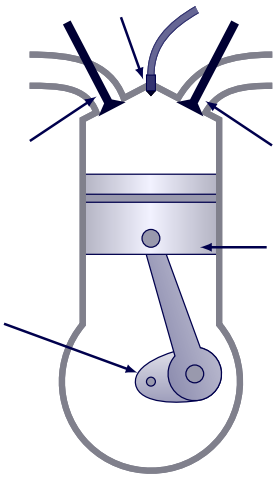


Figure 38 – Moteur à piston

Les phases successives du cycle d'un tel moteur sont les suivantes :

1. _____ d'un mélange d'air et de carburant pulvérisé ;
2. _____ du mélange : fermeture de la soupape d'admission, puis remontée du piston qui comprime le mélange ;
3. _____ et détente ce qui repousse le piston, initiant le mouvement ;
4. _____ : ouverture de la soupape d'échappement et remontée du piston qui chasse les gaz brûlés.

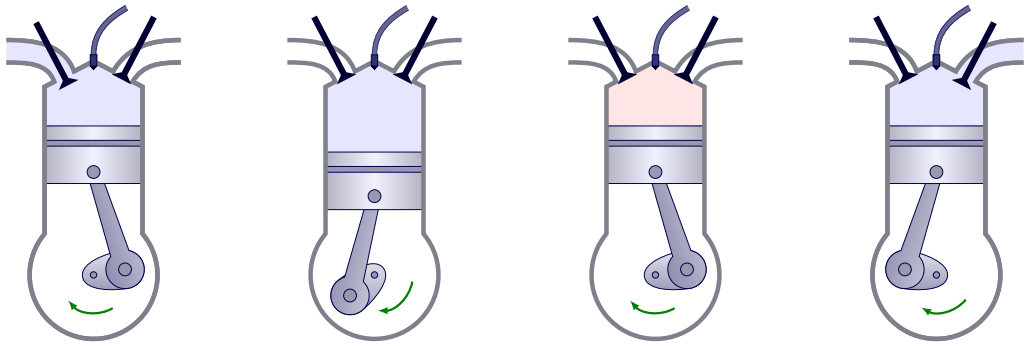


Figure 39 – Cycle d'un moteur à quatre temps

Les pistons peuvent être placés de façons diverses selon l'aéronef considéré :

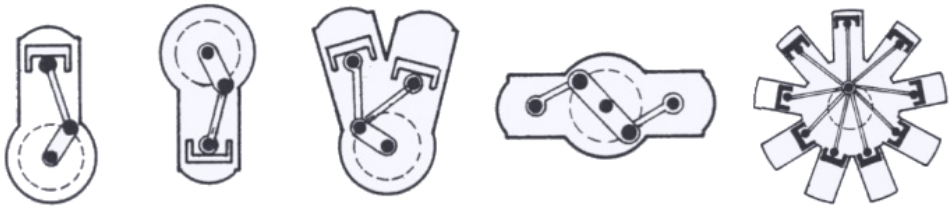


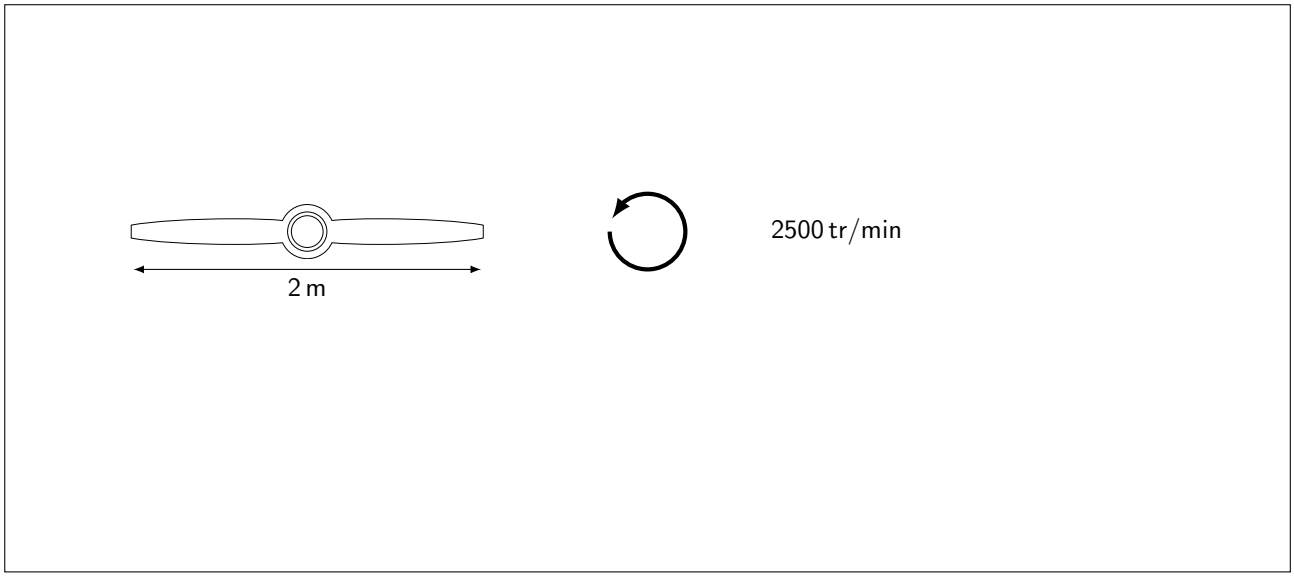
Figure 40 – Disposition des cylindres dans un moteur à pistons

L'alimentation en carburant est effectuée par une **pompe mécanique** qui est doublée par un pompe électrique de secours. Le mélange entre l'air et l'essence est assurée par un **carburateur** ou un système d'**injection**. La proportion entre l'air et l'essence variant avec l'altitude, une commande de **mélange** permet au pilote de régler cette proportion en vol. Le système d'allumage constitué des **magnétos** est toujours doublé en cas de panne.

6.2. Hélice

Une **hélice** tourne grâce au mouvement rotatif imprimé par un moteur et qui, en accélérant vers l'arrière l'air situé devant elle, créé la traction ou la poussée de l'avion. Elle comporte au moins deux pales (mais parfois bien plus). Elle est généralement fabriquée en **bois**, en **alliage d'aluminium** ou en **composite**. Elle est généralement placée à l'avant de l'aéronef créant une traction mais peu aussi être placée à l'arrière pour créer une poussée.

La capacité à mettre en mouvement l'aéronef dépend de la puissance du moteur appliquée et de la vitesse de rotation de l'hélice qui sont en partie liés. Deux hélices tournant à la même vitesse mais avec des moteurs délivrant une puissance différente ne propulseront pas l'aéronef avec la même efficacité. La plupart du temps, les vitesses de rotation en croisière des hélices se situent entre 2000 tr/min pour les plus lourdes et 5000 tr/min pour les plus légères. Calculons la vitesse en km/h d'un point situé situé à l'extrémité d'une hélice de 2 m tournant à 2500 tr/min :



On peut définir le pas à l'aide du schéma suivant :

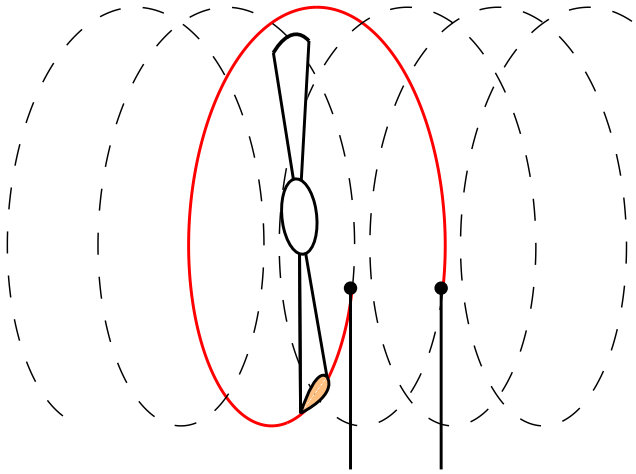


Figure 41 – Pas d'une hélice

Avec le calcul précédent, la vitesse de déplacement d'un point de l'hélice dans l'air est d'autant plus importante que l'on s'éloigne de l'axe de rotation. Afin de répartir correctement la force de traction, l'hélice est vrillée.

D'une certaine façon, la coupe d'une hélice est semblable à la coupe d'une _____ mais possède d'autres particularités : son plan de coupe n'est pas le même tout au long de l'hélice.

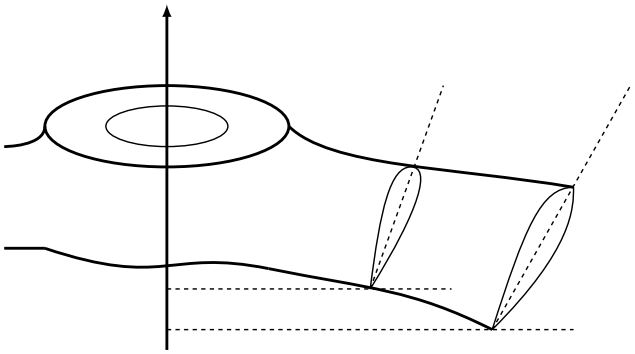


Figure 42 – Vrillage d'une hélice

En réalité, l'hélice n'est pas totalement efficace et elle glisse dans l'air ambiant. Ainsi, on peut aussi définir le pas réel lors du déplacement de l'hélice. On a ainsi une différence entre le pas « géométrique » de l'hélice et son pas réel. Le pas réel inclut donc le glissement de l'hélice dans l'air.

Les hélices à _____ glissent moins dans l'air et sont donc adaptées au décollage mais donneront des vitesses plus faibles en croisière.

Les hélices à _____ ont plus d'inertie lors de l'application de la traction au décollage mais donneront des vitesses plus élevées en croisière.

Ainsi, sur certaines avions, il est possible d'agir en vol sur le pas de l'hélice : on parle alors de _____ _____ ou de _____.

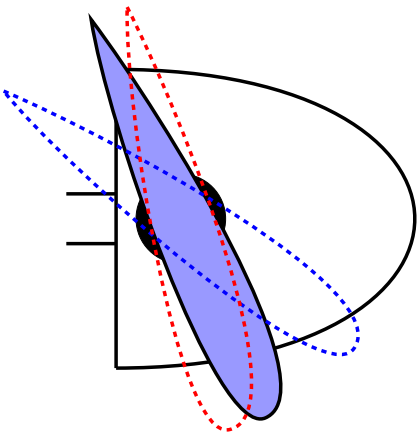


Figure 43 – Vue de profil d'une hélice à pas variable

Contrairement à une hélice à pas fixe, une telle hélice garde une vitesse relativement constante dans une large gamme de puissance délivrée par le moteur. Le ou la pilote dispose d'une manette permettant d'agir sur le pas :

- au décollage et à l'atterrissage, on se place _____ pour avoir une meilleure efficacité à une vitesse faible ;
- en croisière, on se place _____ pour avoir une meilleure efficacité à une vitesse importante.

6.3. Turbomachines

Lorsque l'on gonfle un ballon, la pression de l'air à l'intérieur du ballon est supérieure à la pression de l'air à l'extérieur. Si on libère l'embouchure du ballon, alors l'air à l'intérieur du ballon va être éjecté et, par réaction, créer une force de même direction mais de sens opposé à la vitesse d'éjection.

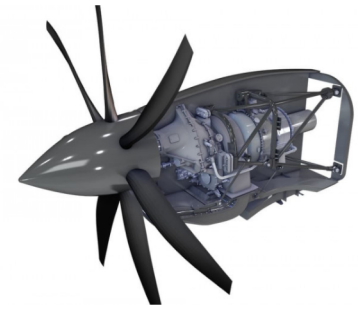
C'est sur ce même principe que fonctionnent les turbomachine : on crée une augmentation de la pression de l'air et on l'éjecte pour :

- propulser directement l'avion avec un _____ ;
- faire tourner une hélice ou un ensemble de rotor avec un _____.

Remarque : *Pour un hélicoptère, on parle plutôt de turbomoteur. Une autre turbomachine, le statoréacteur, n'est pas étudié dans le cadre du BIA.*



(a) Turboréacteur



(b) Turbopropulseur et hélice

Figure 44 – Exemples de turbomachines

Un **turboréacteur double flux**, comme en sont équipés la plupart des avions de ligne, fonctionne sur le principe suivant :

1. la _____ en entrée joue le rôle d'une hélice en propulsant l'air en deux parties ;
2. une partie de l'air passe dans un _____ constitué de roues avec des ailettes ;
3. dans la _____, l'air comprimé est mélangé au carburant ;
4. l'air de la chambre de combustion est ensuite éjecté vers une _____ qui permet d'entrainer la soufflante en étant mélangé à l'autre flux d'air créant ainsi la propulsion.

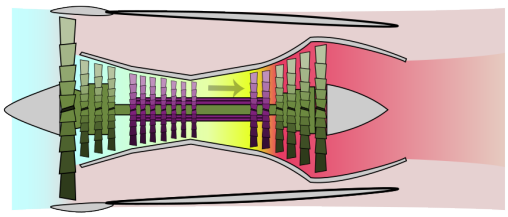


Figure 45 – Turboréacteur à double flux

Remarque : *D'autres réacteurs sont à simple flux. La soufflante entraine tout l'air entrant uniquement dans le compresseur sans séparation : il n'y a qu'un seul flux d'air.*

Un turbopropulseur est tout à fait identique à un truboréacteur simple flux à l'exception du fait que la turbine n'entraine pas uniquement la soufflante mais également l'hélice via un système d'engrenages.

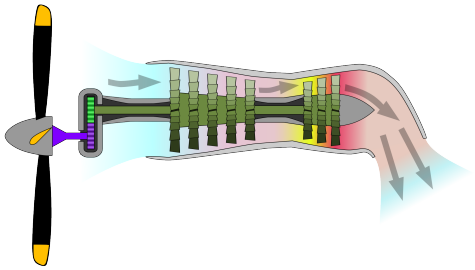


Figure 46 – Turbopropulseur

6.4. Autres motorisations

L'aviation électrique et à hydrogène notamment se développent actuellement. Néanmoins, si les considérations écologiques peuvent justifier le développement de ces nouvelles motorisations, le stockage de la source d'énergie (batterie ou réservoir à hydrogène) est encore lourd et la puissances des moteurs reste en deçà des motorisations utilisant les carburants fossiles.

Les drones peuvent fonctionner avec un moteur électrique lorsqu'ils sont de petite taille même en comportant des calculateurs capables de stabiliser celui- ci en l'air.



(a) Motoplaneur



(b) Drone

Figure 47 – Aéronefs électriques

7. Instruments de bord

Pour la conduite du vol et le suivi d'une navigation, un aéronef doit obligatoirement être équipé des instruments de bord suivants :

- un altimètre ;
- un variomètre ;
- un anémomètre ;
- un horizon artificiel ;
- un indicateur de virage et de dérapage ;
- un compas magnétique compensable ou un indicateur gyroscopique de direction ;

Ces six instruments sont donc classiquement retrouvés dans tous les aéronefs, en des positions généralement semblables d'un appareil à l'autre. Nous allons voir dans cette section le fonctionnement de ces instruments



Figure 48 – Les six instruments du tableau de bord standard

Remarque : *Règlementairement, la liste des équipements dont un aéronef doit disposer pour pouvoir entreprendre un vol est plus complexe et dépend notamment du type de vol a réaliser (vol à vue de jour ou de nuit, vol aux instruments) mais nous n'entrerons pas dans le détail de cette liste dans le cadre de ce cours.*

7.1. L'altimètre

L'altimètre indique l'altitude de l'avion. Celle-ci est affichée en _____, ou plus rarement en mètres. La lecture de l'altitude se fait comme sur une montre : la grande aiguille indique des centaines de pieds tandis que la petite aiguille indique des milliers de pieds.



Figure 49 – Le cadran de l'altimètre

L'altimètre est un instrument pneumatique : son fonctionnement est basé sur la mesure d'une pression. En l'occurrence, l'altimètre mesure la pression statique pour estimer l'altitude de l'avion. En effet, nous verrons dans le chapitre de météorologie que la pression atmosphérique diminue selon une loi théorique précise en fonction de l'altitude. Il suffit donc de graduer le cadran de l'instrument en unité d'altitude pour récupérer cette information.

L'altimètre fonctionne par rapport à une pression de référence réglée par le pilote. Cette pression est choisie par le pilote au moyen d'un système de réglage agissant sur une capsule fermée placée au milieu d'une chambre à la pression atmosphérique courante. L'expansion ou la contraction de la capsule de référence est alors transmise à un dispositif mécanique permettant l'affichage sur le tableau de bord.

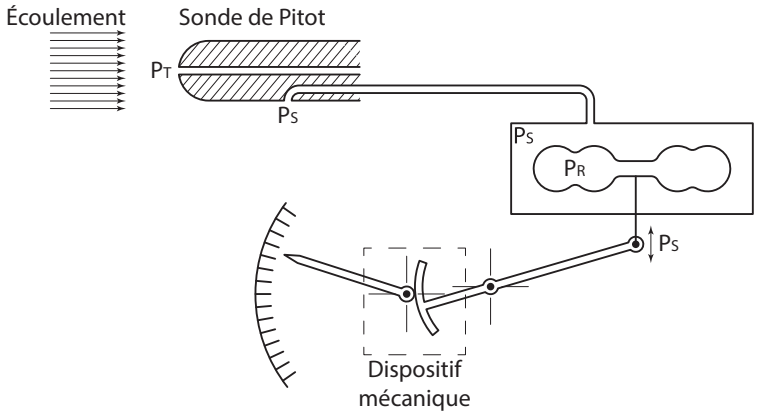


Figure 50 – Principe de fonctionnement de l'altimètre

Il existe trois pressions de références utilisées couramment :

- _____, de sorte que l'altimètre affiche _____ par rapport à la mer ;
- _____ _____, de sorte que l'altimètre affiche _____ ;

- _____, de sorte que l'altimètre affiche _____ par rapport au sol (ce dernier calage est plus rarement utilisé).

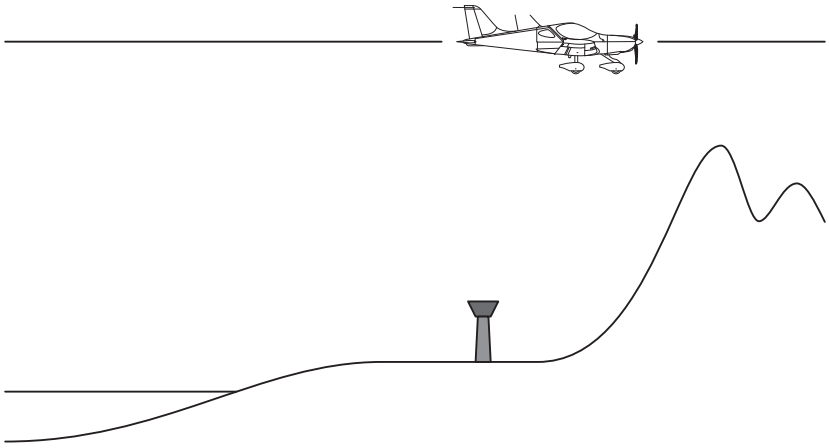


Figure 51 – Les différents calages altimétriques

7.2. Le variomètre

Le variomètre indique la vitesse verticale de l'avion, en montée ou en descente, exprimée en _____ _____, ou plus rarement en mètres par seconde.



Figure 52 – Le cadran du variomètre

Le variomètre est un instrument pneumatique : son fonctionnement est basé sur une mesure de pression. En l'occurrence, le variomètre mesure la différence de pression statique entre l'instant actuel et une pression statique retenue quelques instants auparavant. Pour effectuer cela, la pression statique est amenée à l'intérieur d'une capsule fermée mais également autour de cette capsule par l'intermédiaire d'un orifice capillaire, de sorte que la pression statique s'établit lentement autour de la capsule. Les déformations de la capsule sont ensuite transmises à un dispositif mécanique permettant l'affichage sur le tableau de bord.

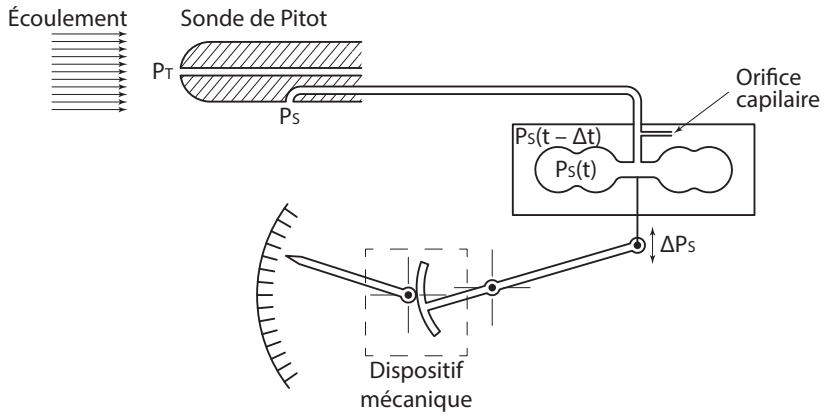


Figure 53 – Principe de fonctionnement du variomètre



Figure 54 – Le cadran de l'anémomètre

7.3. L'anémomètre

L'anémomètre (également appelé badin, du nom de son inventeur) indique la vitesse de l'aéronef par rapport à la masse d'air qui l'entoure. Elle est généralement exprimée en _____ (correspondant à un mile nautique parcouru par heure, soit 1852 m par heure) ou parfois en kilomètres par heure.

Le cadran de l'anémomètre comporte des arcs de couleur qui correspondent à des **vitesses caractéristiques**.

_____ permet d'identifier la plage de vitesses compatibles avec l'utilisation des systèmes hypersustentateurs (volets et becs). La limite basse de l'arc blanc correspond à la vitesse de décrochage pleins volets. La limite haute de l'arc blanc correspond à la vitesse maximale d'utilisation des volets, appelée VFE pour *Velocity Flaps Extended*.

_____ permet d'identifier la plage de vitesses en utilisation normale. La limite basse de l'arc vert correspond à la vitesse de décrochage volets rentrés. La limite haute de l'arc vert correspond à la vitesse à ne pas dépasser en air turbulent, appelée VNO pour *Velocity Normal Operating*.

_____ permet d'identifier la plage de vitesses incompatibles avec la conduite du vol en air turbulent. La limite haute de l'arc jaune est la vitesse maximale que l'avion peut supporter, appelée VNE pour *Velocity Never Exceed*. Cette limite est également matérialisée par un trait rouge.

L'anémomètre est un instrument pneumatique : son fonctionnement est basé sur la mesure de pressions. En l'occurrence, l'anémomètre mesure la pression dynamique pour estimer la vitesse de l'avion par rapport à la masse d'air. Pour effectuer cette mesure, en plus du cadran d'affichage, l'anémomètre est constitué d'une sonde de mesure de pression appelée sonde de Pitot. Celle-ci mesure la pression totale ainsi que la pression statique. Un dispositif à capsule permet de faire la différence entre pression totale et pression statique pour déterminer la pression dynamique, transmise à un dispositif mécanique permettant l'affichage sur le tableau de bord.

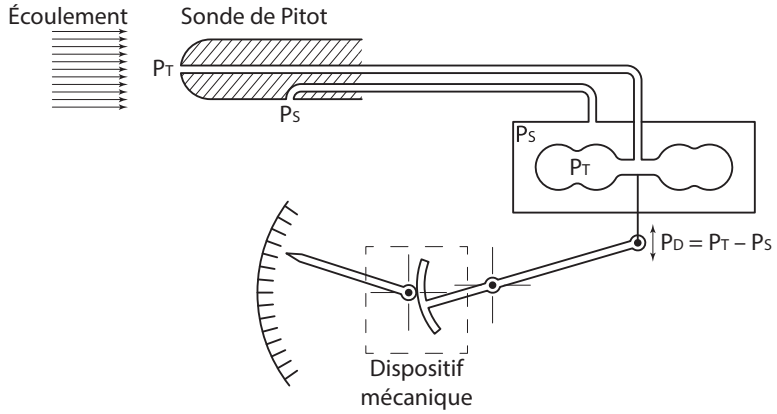


Figure 55 – Principe de fonctionnement de l'anémomètre

7.4. L'horizon artificiel

L'horizon artificiel restitue la position de l'horizon naturel lorsque celui-ci n'est pas visible (lors d'un vol de nuit ou dans les nuages). Il devient alors possible de contrôler l'attitude de l'avion par une parfaite similitude avec le vol à vue.

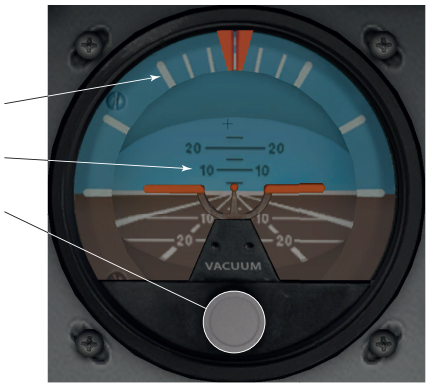


Figure 56 – Le cadran de l'horizon artificiel

L'horizon artificiel est constitué :

- d'une maquette centrale qui représente l'avion, fixe par rapport à l'avion ;
- d'une couronne extérieure mobile par rapport à l'avion, sur laquelle figurent des graduations indiquant les valeurs de l'inclinaison de l'avion ;
- d'une sphère intérieure mobile par rapport à l'avion et à la couronne extérieure, sur laquelle figurent des graduations indiquant les valeurs d'assiette de l'avion.

Lors d'un mouvement de l'avion, c'est l'ensemble {avion + maquette} qui se déplace autour de la sphère et de la couronne rendues fixes dans l'espace par un gyroscope.

L'horizon artificiel est un instrument gyroscopique : son fonctionnement est basé sur la rotation rapide d'une pièce massive (le gyroscope), assurée par un moteur pneumatique ou électrique. L'axe du gyroscope est fixé à un cadre mobile lié à la sphère. Ce cadre mobile est lui-même orientable par rapport à un cadre intermédiaire lié à la couronne. L'ensemble est également orientable par rapport au boitier de l'instrument et à l'avion.

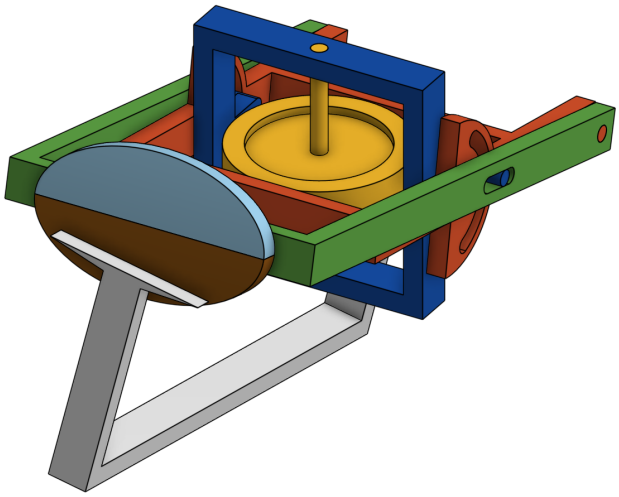


Figure 57 – Principe de fonctionnement de l'horizon artificiel

7.5. L'indicateur de virage et de dérapage

L'indicateur de virage et de dérapage est en fait la réunion de deux instruments.



Figure 58 – Le cadran de l'indicateur de virage et de dérapage

L'indicateur de virage est, dans une certaine mesure, en doublon par rapport à l'horizon artificiel bien que les informations qu'il apporte soient légèrement différentes. Là où l'horizon artificiel donne précisément l'inclinaison de l'avion par rapport à la verticale, l'indicateur de virage indique uniquement le taux de virage, dépendant notamment de la vitesse de l'avion. Ainsi, l'indicateur de virage possède généralement une seule graduation (parfois deux) indiquant l'inclinaison nécessaire à avoir pour que l'avion effectue un tour complet en deux minutes.

L'indicateur de virage est un instrument gyroscopique : son fonctionnement est basé sur la rotation rapide d'une pièce massive (le gyroscope), assurée par un moteur pneumatique ou électrique. L'axe du gyroscope est fixé à un cadre mobile lié à la maquette ou à l'aiguille. L'ensemble est orientable par rapport au boitier de l'instrument et

à l'avion. Le principe de fonctionnement de l'indicateur de virage est tout à fait similaire à celui de l'horizon artificiel (à quelques éléments près) et nous ne présenterons pas d'illustration spécifique pour son fonctionnement.

L'indicateur de dérapage permet d'identifier si le flux d'air est symétrique sur les deux ailes. Ceci est obtenu en maintenant la bille au centre de l'instrument, entre les deux marques. Un défaut de symétrie dans le vol peut être gênant car cela se traduit pas le fait qu'une aile engendre une plus forte portance que l'autre.

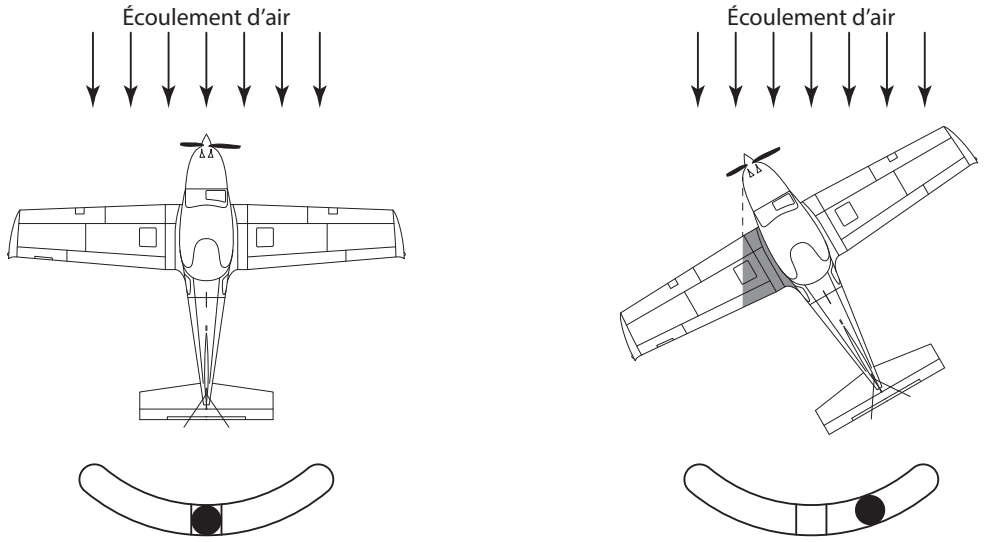


Figure 59 – Principe de fonctionnement de l'indicateur de dérapage

7.6. Le compas ou l'indicateur de direction

Le compas ou l'indicateur de direction permettent de mesurer l'orientation de l'avion par rapport au nord magnétique.



Figure 60 – Le cadran du compas magnétique

Le compas est un instrument mécanique : son fonctionnement est basé sur la rotation libre d'un aimant. Il s'agit d'une boussole libre de s'aligner sur le champ magnétique terrestre. Sur cet aimant est fixée une couronne graduée indiquant la direction suivie par l'avion en dizaine de degrés. Généralement, les directions principales sont indiquées par des lettres selon l'initiale anglaise : _____ pour le nord ; _____ pour l'ouest ; _____ pour le sud et _____ pour l'est. Pour pouvoir utiliser le compas magnétique, il est nécessaire d'être en vol stabilisé, c'est-à-dire hors montée/descente, virage, accélération. Par ailleurs, les indications fournies par le compas magnétique sont antidirectionnelles : en volant vers le sud par exemple, pour tourner de manière à suivre le cap 150 il faut tourner

vers la gauche alors que l'indication « 15 » est située à droite sur le compas magnétique. Pour ces raisons, on lui préfère généralement l'indicateur de direction.



Figure 61 – Le cadran de l'indicateur de direction

L'indicateur de direction est une instrument gyroscopique : son fonctionnement est basé sur la rotation rapide d'une pièce massive (le gyroscope), assurée par un moteur pneumatique ou électrique. L'axe du gyroscope est fixé à un cadre mobile lié à un disque gradué. L'ensemble est orientable par rapport au boitier de l'instrument et à l'avion.

Au bout d'un certain temps, le gyroscope perd sa référence d'orientation. Il est donc nécessaire de le recaler périodiquement (toutes les quinze minutes environ) sur la référence du compas magnétique en s'étant assuré que le vol est stabilisé, de manière à pouvoir y lire des indications fiables.

7.7. Cas des avions avec instrumentation digitale

Nous avons présenté ici les versions analogiques des instruments de bord. Sur les avions disposant d'une instrumentation plus moderne, les six instruments vus ici sont toujours présents, mais leur organisation est revue pour être intégrée sur un affichage unique synthétique.

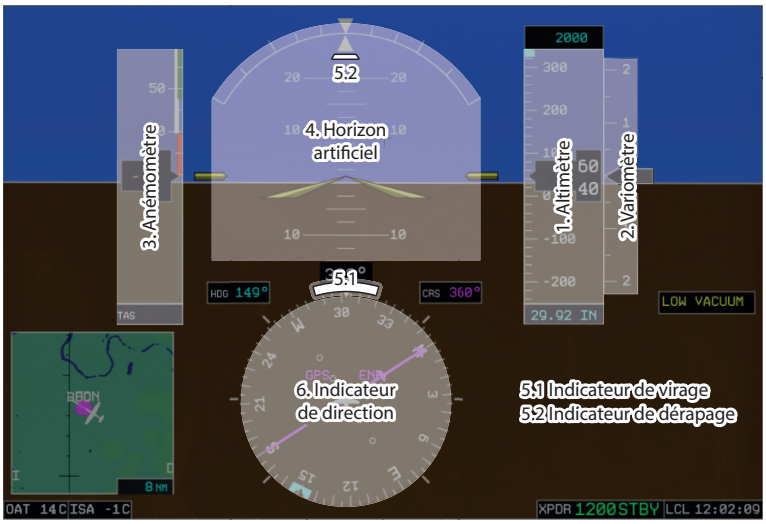


Figure 62 – La présentation synthétique des instruments sur afficheur digital

8. Engins spatiaux

Cette partie, concernant les engins spatiaux (essentiellement les fusées et les satellites), est plus réduite compte tenu de la grande diversité de ces appareils.

8.1. Description d'une fusée

La fusée est un véhicule _____ qui se déplace dans l'atmosphère ou l'espace propulsé par un ou plusieurs _____. Parmi les fusées, on note :

- les _____ destinés à une utilisation militaire et contenant une charge explosive ;
- les _____ destinées à un usage civil ou militaire et permettant d'effectuer des mesures et des expériences dans la haute atmosphère ;
- les _____ destinés à un usage civil ou militaire et capable de placer une charge utile (un satellite ou un vaisseau habité par exemple) en orbite autour de la Terre ou de l'envoyer dans l'espace interplanétaire.

Les fusées nécessitent généralement d'importantes installations au sol qu'on appelle _____ _____ comportant

- soit une rampe de lancement pour les fusées les plus simples et les plus légères ;
- soit une table de lancement (ou plateforme de lancement) fixe ou mobile à laquelle est associée une tour (qui a permis ou non le montage de la fusée).



(a) Missile



(b) Fusée-sonde



(c) Lanceur

Figure 63 – Différentes fusées

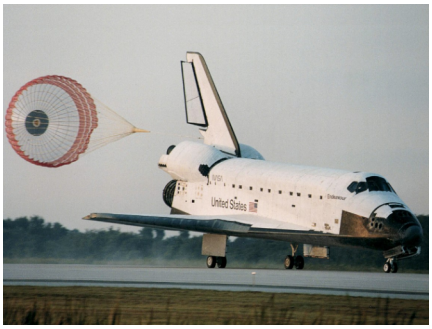
La plupart des fusées ne sont pas réutilisables : les débris qu'elle engendrent peuvent retomber sur terre, se désintégrer dans l'atmosphère ou rester en orbite. Une problématique de cout et de création de débris spatiaux est actuellement étudiée et des lanceurs réutilisables sont en passe d'être opérationnels d'ici 2030.

Remarque : *L'European Space Agency a répertorié environ 26 000 objets dans l'espace, dont seulement 7 % sont en activité. La station spatiale internationale a dû altérer sa trajectoire à trois reprises en 2020 afin d'éviter des collisions : ces manœuvres sont couteuses et l'élimination des débris orbitaux est cruciale.*

Les lanceurs sont à distinguer des _____ et des _____ _____.

Une navette spatiale est un véhicule spatial pouvant revenir sur Terre en effectuant un atterrissage contrôlé à la manière d'un avion ou d'un planeur et pouvant être réutilisé pour une mission ultérieure.

Un vaisseau spatial est un véhicule spatial effectuant une rentrée dans l'atmosphère sans planer et atterrissant grâce à des parachutes et des rétrofusées.



(a) Navette



(b) Vaisseau

Figure 64 – Véhicules spatiaux

La _____ est, dans l'industrie spatiale, la partie d'un engin spatial qui est destinée à remplir les objectifs de la mission. Par exemple, la charge utile d'un lanceur est le satellite ou la sonde spatiale qu'il doit placer en orbite voire les passagers. Cette charge utile représente une très faible part de la masse totale d'une fusée (généralement 10 %) car le carburant à embarquer au départ en représente la plus grande partie.

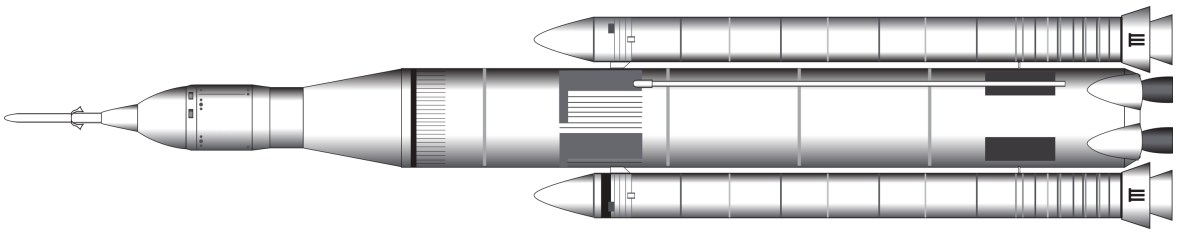


Figure 65 – Description d'un lanceur

Remarque : *La charge utile sera aussi abordée pour les aéronefs dans la partie sur la mécanique du vol : elle inclura cette fois le carburant et les passagers notamment.*

8.2. Propulsion d'une fusée

Le moteur-fusée est un type de moteurs à réaction, c'est-à-dire un engin qui projette un fluide (gaz ou liquide) vers l'arrière, ce qui transmet par réaction une poussée au véhicule attaché au moteur. Le moteur-fusée expulse une matière qui est entièrement stockée dans le corps du véhicule et dont la réaction se produit sans apport extérieur ce qui est différent des moteur à pistons et des turbomachines qui utilisent _____ _____.

Généralement, un moteur fusée fonctionne en expulsant des gaz qui sont produits par une réaction chimique qui dégage beaucoup de chaleur et faisant intervenir :

- _____, généralement un ergol (c'est-à-dire une substance destinée à fournir de l'énergie ;
- _____, généralement un autre ergol qui, mélangé au carburant produit la combustion.

Les gaz chauds sont éjectés dans la tuyère et produisent le mouvement de la fusée.

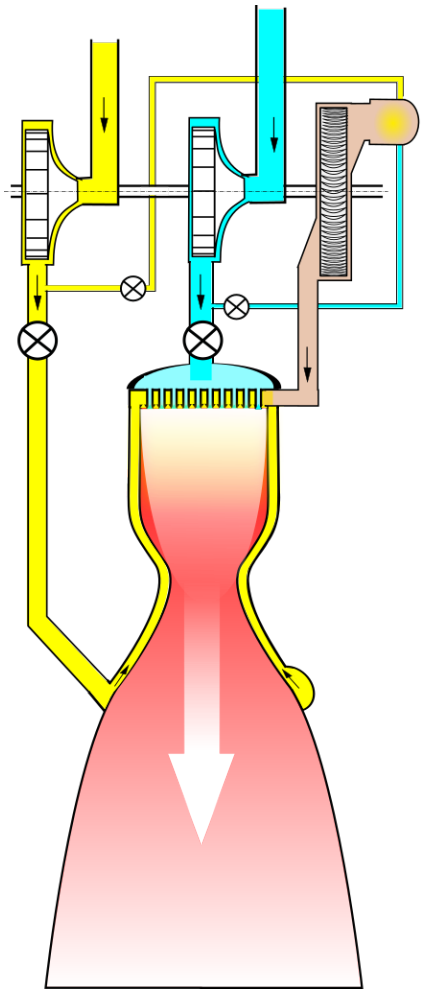


Figure 66 – Moteur-fusée

Remarque : *La proximité du carburant et du comburant dans une fusée ainsi que la chaleur intense dégagée constituent des enjeux majeurs de sécurité dans le transport spatial.*

8.3. Satellites et sondes

Dans cette partie, nous nous intéressons à deux objets généralement envoyé dans l'espace à l'aide de lanceurs : les sondes et les satellites artificiels.

Une **sonde spatiale** est un véhicule spatial sans équipage permettant d'étudier à plus ou moins grande distance les objets célestes : soleil, planète, lune, comète, astéroïde, milieu interplanétaire ou milieu interstellaire.

Un **satellite artificiel** est un objet fabriqué par l'être humain gravitant autour d'une planète ou d'un satellite naturel comme la Lune. La distance par rapport à l'objet céleste autour duquel le satellite gravite ainsi que sa vitesse initiale revêtent une importance fondamentale dans la mécanique de son vol. Les satellites artificiels servent principalement à l'observation (météorologique, océanographie par exemple), à la communication (téléphonie, positionnement) dans le domaine civil ou militaire.



(a) Sonde



(b) Satellite

Figure 67 – Sondes et satellites

Un satellite ou une sonde est suivi par un centre de contrôle au sol, qui envoie des instructions et recueille les données collectées grâce à un réseau de stations terrestres. Un tel objet est généralement autonome énergétiquement : il récupère celle-ci grâce à des panneaux solaires.

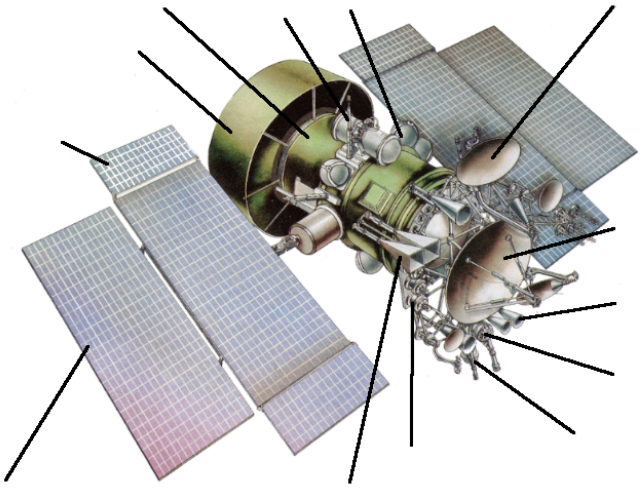


Figure 68 – Description d'un satellite