

*Aérostatique,
aérodynamique
et principes du vol*



Table des matières

1. Aérostatique	5
1.1. Le ballon à air chaud	5
1.2. Le ballon à gaz	6
1.3. Le dirigeable	6
2. Aérodynamique	7
2.1. Les forces aérodynamiques	7
2.2. Courbe polaire d'une aile	10
2.3. Retour sur les caractéristiques de l'aile	15
3. Mécanique du vol	17
3.1. Équilibre, stabilité et maniabilité de l'aéronef	17
3.2. Relation assiette, pente, incidence	20
3.3. Étude du vol stabilisé	20
4. Le vol spatial	25
4.1. Loi de la gravitation universelle	25
4.2. Lois de Kepler	27
4.3. Les orbites	27

1. Aérostatique

Les aérostats sont des aéronefs plus légers que l'air dont la sustentation est assurée par le _____

_____ qui s'énonce ainsi :

« Tout corps plongé dans un fluide au repos subit une force verticale dirigée vers le haut de norme égale au poids du volume de fluide déplacé. »

Ici, le corps est l'aérostат et le fluide est l'atmosphère environnante. La force de poussée d'Archimède $\vec{F}_A$ peut donc s'écrire

$$\vec{F}_A = -\rho_{\text{ext}} \vec{g} V$$

où ρ_{ext} est la masse volumique de l'air extérieur, $\vec{g}$ est l'accélération de la pesanteur et V est le volume de l'air déplacé par l'aérostат.

Parallèlement à cela, l'enveloppe de l'aérostат est remplie d'un gaz et l'on peut calculer la force de pesanteur $\vec{F}_P$ qu'il subit à l'aide de la relation

$$\vec{F}_P = \rho_{\text{int}} \vec{g} V$$

où ρ_{int} est la masse volumique du gaz intérieur. Cette force de pesanteur est appliquée verticalement vers le bas.

Le ballon à air chaud est donc soumis à deux forces de même direction, de sens opposé et de norme différentes, de sorte que l'effort résultant (la force aérostатique $\vec{F}$) sera calculé par somme des deux forces élémentaires :

$$\vec{F} = \vec{F}_A + \vec{F}_P = (\rho_{\text{ext}} - \rho_{\text{int}}) \vec{g} V$$

La sustentation du ballon à air chaud est rendue possible par le fait que la masse volumique de l'air dépend fortement de la température : à 15 °C, la masse volumique de l'air vaut $\rho_{15} = 1,225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ tandis qu'à 100 °C elle ne vaut plus que $0,946 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Exercice 1

À l'aide des valeurs de masse volumique proposées ci-dessus, **déterminer** la norme de la force aérostатique s'appliquant sur une montgolfière de 2550 m^3 de volume.

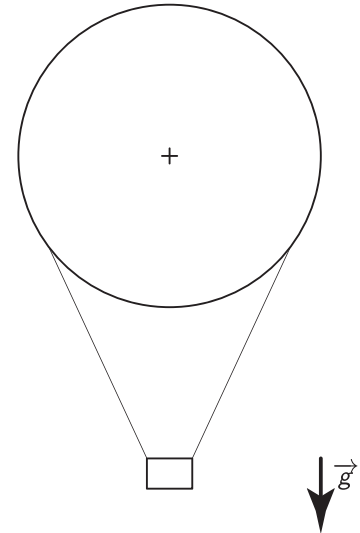


Figure 1 – Forces aérostатiques.

1.1. Le ballon à air chaud

Dans un ballon à air chaud, l'air chaud est contenu dans une _____ ouverte à sa partie inférieure et au sommet de laquelle on trouve une _____ qui peut être actionnée depuis la _____ au moyen d'une corde. L'ouverture de la soupape laisse échapper l'air chaud afin de faire descendre le ballon puis, lors de l'atterrissage, de dégonfler rapidement l'enveloppe.

Lorsque le ballon s'élève, la température de l'air extérieur diminue, ainsi que la température de l'air intérieur, de sorte qu'un équilibre se crée et la masse des éléments de volume négligeable (nacelle et équipage) tend à faire redescendre le ballon. Il est alors nécessaire de réchauffer l'air au moyen de _____ alimentés par des bouteilles de propane liquide.

De par son principe de pilotage, le ballon à air chaud ne peut que monter ou descendre. Son déplacement relatif au sol n'est que le résultat de l'effet du vent (force et direction) et une bonne connaissance des caractéristiques du vent aux différentes altitudes permet de modifier dans une certaine mesure la route suivie par la montgolfière.

1.2. Le ballon à gaz

Dans un _____, l'enveloppe est constituée d'un matériau caoutchouc ou d'un matériau synthétique étanche muni, à sa partie inférieure d'un tuyau appelé _____ et destiné au gonflement ou à l'évacuation du gaz lorsque celui-ci se dilate avec l'altitude.

Comme pour le ballon à air chaud, le haut de l'enveloppe est équipé d'une _____ que l'aérostat peut actionner depuis la nacelle pour permettre l'évacuation du gaz.

À la différence du ballon à air chaud, la montée est possible grâce au fait que le gaz embarqué (généralement de l'hélium) est plus léger que l'air. Mais s'il est possible de réchauffer l'air du ballon à air chaud, il n'est pas possible d'ajouter de l'hélium en cours de vol. Il est donc nécessaire d'emporter du lest (sable ou eau) qui sera largué pour diminuer la masse du ballon et lui permettre de s'élever dans l'atmosphère. La descente se fera grâce à la soupape, en libérant une petite quantité de gaz par le haut du ballon.

Pour l'atterrissage, le ballon à gaz est généralement équipé d'une _____ : une grosse corde de quelques dizaines de mètres qui est larguée à l'approche du sol pour freiner le ballon et permettre à des personnes au sol, en s'en saisissant, d'arrêter le ballon et de l'amarrer.

1.3. Le dirigeable

Pour palier l'inconvénient majeur des ballons à air chaud et à gaz, pour lesquels le seul pilotage possible est le pilotage en montée et en descente, le _____ a été conçu en ajoutant sur un ballon à gaz :

- _____, permettant à l'aérostat de se déplacer dans le plan horizontal ;
- _____, permettant d'orienter l'aérostat dans le plan horizontal et d'initier des montées ou descentes.

Ainsi, pour le contrôle du dirigeable, on trouve à l'arrière des plans fixes appelés _____, sur lesquels s'articulent des parties mobiles appelées _____.



(a) Le ballon à air chaud.



(b) Le ballon à gaz.



(c) Le dirigeable.

Figure 2 – Les aérostats.

2. Aérodynamique

2.1. Les forces aérodynamiques

2.1.1. Mise en évidence des forces aérodynamiques

Si l'on place une plaque plane en travers d'un flux d'air, il est possible de mesurer à l'aide d'un dynamomètre une _____ exercée par l'air sur la plaque.

Cette force est due d'une part au fait que l'air projeté sur la plaque vient faire _____ sur la face de la plaque située sur la gauche, mais également du fait que de l'autre côté, une zone _____ apparaît, associée à une _____. Ces deux effets se combinent pour pousser la plaque vers la droite.

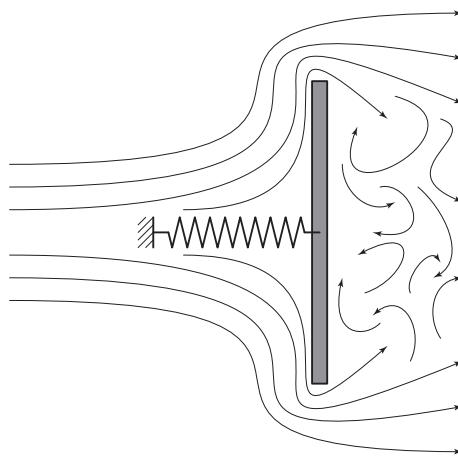


Figure 3 – Écoulement de l'air autour d'une plaque perpendiculaire à l'écoulement.

Cet effet est intéressant, mais il est orienté dans la direction du flux d'air. Si l'on veut pouvoir soulever un aérodyne, il faut trouver une solution de réorienter cet effet vers le haut.

Si on incline la plaque différemment, il est possible de conserver le même effet en déplaçant les zones de surpression et de dépression, de sorte que l'effort résultant soit orienté dans une direction intéressante.

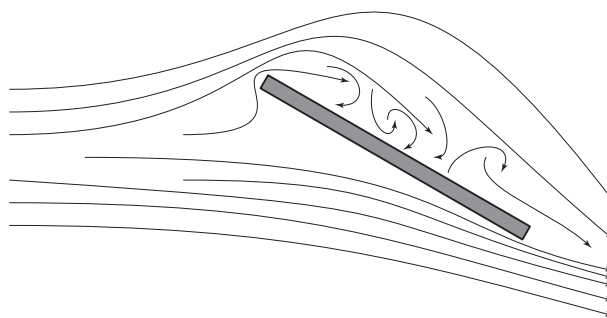


Figure 4 – Écoulement de l'air autour d'une plaque inclinée par rapport à l'écoulement.

Dans cette nouvelle situation, la force aérodynamique possède deux composantes :

- une composante verticale dirigée vers le haut et s'opposant à l'action de la pesanteur, appelée _____ ;
- une composante horizontale dirigée vers l'arrière et s'opposant à l'action des moteurs, appelée _____.

L'angle formé entre la plaque (ou l'aile de l'avion) et la direction de l'écoulement d'air est appelé _____. Nous verrons un peu plus tard dans ce chapitre qu'il est fondamental en aéronautique.

La plaque étant ainsi orientée, on commence à deviner l'effet sur une aile et sur l'avion. Mais si cette surpression sur l'intrados, du côté où l'écoulement est _____, associée à la dépression de l'extrados, du côté où l'écoulement est _____, permet de porter l'aile, on peut souhaiter améliorer encore l'effet en faisant en sorte que la force aérodynamique soit orientée le plus verticalement possible. Malheureusement, on s'aperçoit bien que l'angle formé entre l'aile et la direction de l'écoulement possède une valeur minimale en dessous de laquelle la force aérodynamique n'existera plus.



Figure 5 – Écoulement de l'air autour d'une plaque parallèle à l'écoulement.

2.1.2. Effet de la vitesse pour la création de portance

Pour pouvoir améliorer encore la direction de l'effort aérodynamique, à ce principe de surpression/dépression s'ajoute également un phénomène découvert et théorisé par le physicien _____ selon lequel dans un fluide, la pression est liée à la vitesse selon la relation (hors programme) suivante :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2 + \rho gh_2$$

où P_i représente la pression du fluide, ρ représente la masse volumique du fluide, v_i représente la vitesse du fluide, g représente l'accélération de pesanteur et h_i représente la hauteur du fluide ; ce qui se réduit à

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2$$

pour notre cas où l'on considère un écoulement horizontal.

Ainsi, en donnant à l'aile d'avion un profil plus complexe, il est possible d'accélérer le flux d'air passant sur l'extrados par rapport au flux d'air passant sous l'intrados.

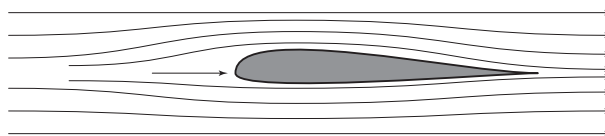


Figure 6 – Écoulement de l'air autour d'une aile parallèle à l'écoulement.

Remarque : si le fait d'utiliser ce principe de création de la force aérodynamique est intéressant, il reste toutefois une petite composante de trainée due aux frottement de l'air contre la surface de l'aile.

2.1.3. Effet de l'incidence pour la variation de portance

Enfin, puisque l'avion doit pouvoir monter et descendre, il faut être capable de moduler l'effort de portance de manière à ce qu'il puisse être

- _____ à l'effort de pesanteur pour permettre à l'avion de _____ ;
- _____ à l'effort de pesanteur pour permettre à l'avion de _____.

Si la vitesse de l'avion varie peu, il est possible de combiner les deux phénomènes pour faire varier la force aérodynamique générée par l'aile.

Remarque

En réalité, la vitesse de l'avion par rapport à l'air n'est pas la même en montée et en descente mais un raisonnement simple permet de constater que l'effet de la vitesse en montée ou en descente aurait même tendance à être contreproductif :

- en montée, la vitesse (et donc également la différence de vitesse entre l'intrados et l'extrados) a plutôt tendance à _____, se traduisant par une dépression _____ sur l'extrados et une montée « _____ » ;
- en descente, la vitesse (et donc également la différence de vitesse entre l'intrados et l'extrados) a plutôt tendance à _____, se traduisant par une dépression _____ sur l'extrados et une descente « _____ » ;

En considérant donc la vitesse constante, l'effort aérodynamique dû à la différence de vitesse entre l'intrados et l'extrados est constant.

- En _____, le nez de l'avion étant orienté vers le haut, ceci se traduit par une _____, ce qui _____ l'effet de surpression sur l'intrados et l'effet de dépression sur l'extrados de manière à _____ la portance ;
- En _____, le nez de l'avion étant orienté vers le bas, ceci se traduit par une _____, ce qui _____ l'effet de surpression sur l'intrados et l'effet de dépression sur l'extrados de manière à _____ la portance ;

Cependant, ce principe est limité. En effet, si l'on augmente l'incidence au delà d'une valeur maximale :

- la force aérodynamique se retrouve à nouveau inclinée trop fortement vers l'arrière et perd en efficacité ;
- et, surtout, pour que la force aérodynamique puisse apparaître, il faut que l'air _____ autour de l'aile, ce qui n'est plus vérifié si l'écoulement devient turbulent.

Ainsi, il existe une incidence limite, appelée _____, au delà de laquelle la force de portance diminue significativement. Les filets d'air se « décrochent » de l'extrados, l'aile n'est plus dans un flux d'air et s'enfonce.

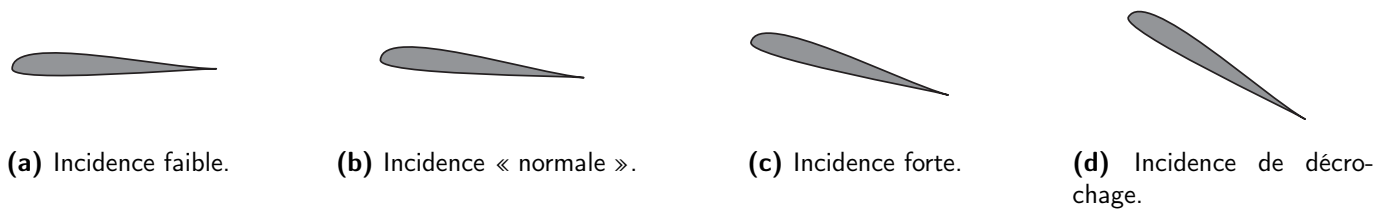


Figure 7 – Influence de l'incidence sur l'effort aérodynamique.

2.2. Courbe polaire d'une aile

Comme nous venons de le voir, l'intensité de la force aérodynamique — et donc des forces de portance et de trainée — est liée à l'incidence de l'aile dans le flux d'air.

En réalisant des essais en soufflerie, il est possible de mesurer ces forces de portance et de trainée. En conservant l'incidence constante les premières mesures permettent de constater que la norme de la force aérodynamique évolue en fonction de la vitesse selon la relation :

$$F_a =$$

où

- _____ est la masse volumique de l'air ;
- _____ est la surface de l'aile ;
- _____ et la vitesse de l'écoulement par rapport à l'aile ;
- _____ est un terme constant dépendant de la forme du profil.

En notant z l'axe vertical et x l'axe horizontal, on peut décomposer cette relation en deux relations quasiment identiques et permettant de déterminer la norme de la portance F_z (composante verticale de la force aérodynamique) et la norme de la trainée F_x (composante horizontale de la force aérodynamique).

- Pour la force de portance :

$$F_z =$$

- Pour la force de trainée :

$$F_x =$$

Dans ces deux expressions, C_z et C_x sont donc respectivement le coefficient de portance et le coefficient de trainée, correspondant l'un et l'autre à « la composante verticale » ou à « la composante horizontale » du coefficient C .

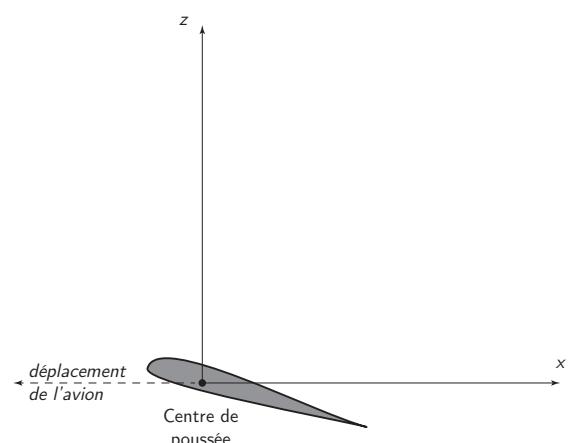


Figure 8 – Décomposition de la résultante aérodynamique.

Lors d'un essai en soufflerie nous pouvons contrôler la vitesse du flux d'air et ainsi, puisque la géométrie de l'aile (donc sa surface) est connue, nous pouvons mesurer les coefficients de portance et de trainée pour différentes valeurs de l'angle d'incidence. À titre d'exemple, une expérimentation a conduit aux résultats présentés sur le tableau suivant.

Table 1 – Mesure des coefficients de portance C_z et de trainée C_x pour différentes valeurs de l'angle d'incidence α .

α	-2°	0°	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	17°	18°
C_z	0,00	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,80	0,95	1,05	1,10	1,15	1,05
C_x	0,010	0,012	0,015	0,020	0,030	0,040	0,050	0,065	0,085	0,105	0,120	0,140

2.2.1. Expression de la trainée

La trainée est la force représentative de la _____ : elle est due essentiellement aux forces de frottement de l'air sur le profil, à la forme du profil et elle prend en compte également la trainée induite par la portance.

Le coefficient de trainée C_x permet de prendre en compte les caractéristiques de l'aile (forme, épaisseur, envergure dont nous parlerons un peu plus tard). Pour une aile donnée, comme nous venons de le voir, la valeur du coefficient de trainée varie en fonction de l'incidence. Pour de nombreux profils, la trainée est minimale pour une incidence légèrement négative puis, lorsque l'incidence _____, la trainée _____, puis _____ comme illustré sur la figure 9 ci-dessous.

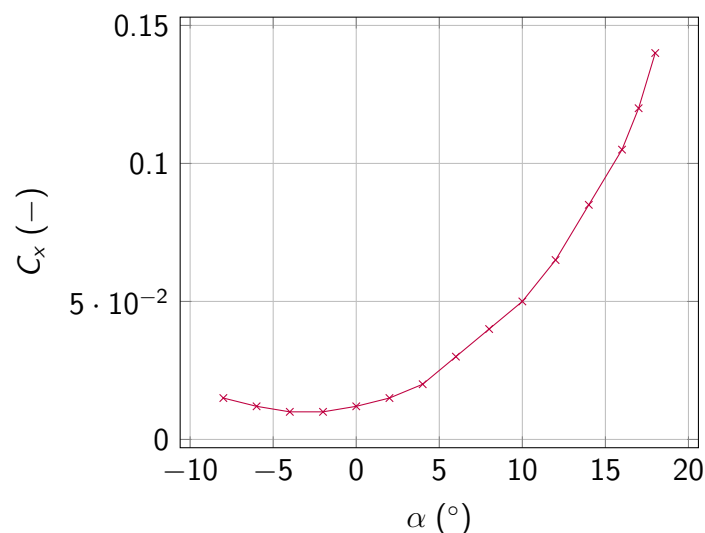


Figure 9 – Evolution du coefficient de trainée C_x en fonction de l'incidence α .

En vol, des dispositifs particuliers permettent d'augmenter fortement la trainée : ce sont _____. Ces surfaces peuvent être placées sur l'extrados, sur l'intrados ou sur le fuselage. Elles sont toujours disposées symétriquement par rapport à l'axe longitudinal de l'avion. La sortie des aérofreins permet :

- en palier, _____ ;
- en descente, _____ ;
- à l'atterrissage, de diminuer les distances de roulement par freinage aérodynamique.

2.2.2. Expression de la portance

La portance est la composante verticale et perpendiculaire au vent relatif. Elle _____.

Le coefficient de portance C_z prend en compte les caractéristiques de l'aile (forme, épaisseur, envergure dont nous parlerons un peu plus tard). Pour une aile donnée, la valeur du coefficient de portance varie en fonction de l'incidence. Nous notons grâce à la figure 10 ci-dessous, que le coefficient de portance _____ jusqu'à ce que celle-ci atteigne l'incidence maximale appelée _____. Au delà de cette valeur d'incidence, le coefficient de portance chute brutalement, l'avion perd de l'altitude.

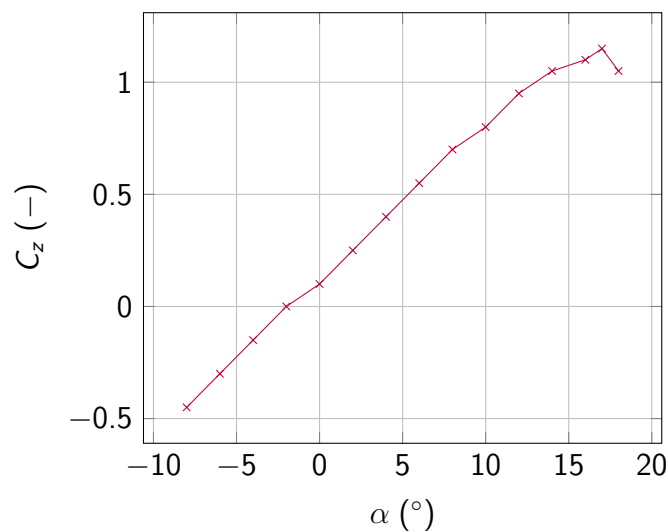


Figure 10 – Evolution du coefficient de portance C_z en fonction de l'incidence α .

En vol, des dispositifs particuliers permettent d'augmenter la portance : ce sont _____ et _____. Ces surfaces sont toujours disposées symétriquement par rapport à l'axe longitudinal de l'avion. La sortie des volets et becs permet _____ et, en phase finale d'atterrissage, de _____ de l'aéronef.

Il est à noter que les volets et les becs ont une influence également sur le coefficient de trainée mais leur effet le plus significatif porte sur le coefficient de portance.

2.2.3. Courbe polaire d'une aile

La courbe polaire d'une aile caractérise les performances aérodynamiques d'une aile et, par extension, de l'avion complet. Les premiers tracés de courbes polaires sont dus à _____ et à _____ durant la seconde moitié du XIX^e siècle.

La courbe polaire d'une aile est une courbe paramétrée qui présente l'évolution du coefficient de portance C_z en fonction du coefficient de trainée C_x selon le paramètre d'incidence α .

Compte tenu des résultats de mesures présentés dans la table 1, la courbe polaire de l'aile étudiée est présentée sur la figure 11 page suivante.

La polaire est donc la « carte d'identité » de l'aile : elle indique clairement les caractéristiques de la voilure et permet de comparer des ailes entre elles.

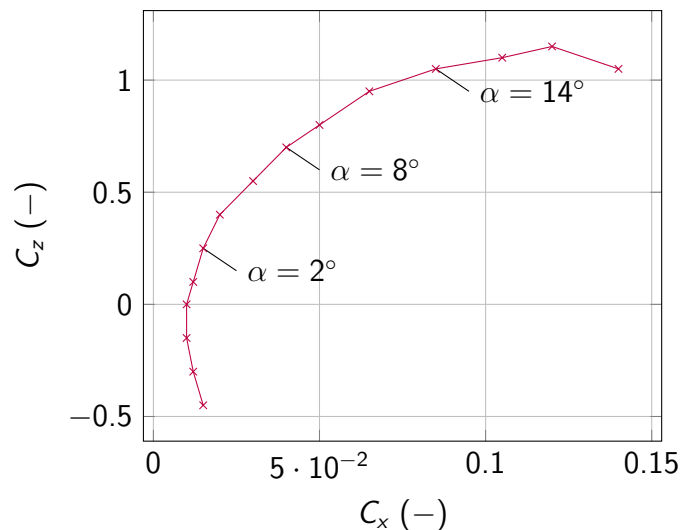


Figure 11 – Evolution des coefficients de portance C_z et de trainée C_x en fonction de l'incidence α .

Le but recherché dans le dessin d'un profil d'aile est d'obtenir le maximum de portance pour le minimum de trainée. Il est donc intéressant de calculer le rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de trainée. Ce rapport est appelé finesse aérodynamique. Plus il est élevé, plus le rendement aérodynamique de l'aile est élevé.

$$\text{finesse aérodynamique} = \frac{C_z}{C_x}$$

Sur la figure 11, à chaque incidence correspondent une valeur de C_z et une valeur de C_x donc une valeur de finesse. Pour plus de lisibilité, on a schématisé sur la figure ci-contre la polaire de l'aile et l'on peut définir un angle θ entre l'axe des abscisses et la droite reliant l'origine au point considéré sur la polaire. Ainsi, par définition,

$$\tan \theta = \frac{C_z}{C_x} = \text{finesse}$$

Si l'on déplace le point étudié le long de la courbe de finesse, on constate aisément que l'angle θ évolue. Sur cette polaire, intéressons-nous à cinq points particuliers.

Le point _____, pour lequel _____, est le point de _____. À cette incidence (-2° sur le profil présenté sur la table 1), l'incidence généralement négative est à l'origine d'une force de « portance » dirigée vers le bas qui compense exactement la force de portance toujours due à la différence de vitesse entre l'extrados et l'intrados et qui reste dirigée vers le haut.

Le point _____ est le point pour lequel la _____. À cette incidence, les frottements exercés par l'air sur l'aile seront les plus faibles. Cette incidence donne à l'aile une position dans laquelle son épaisseur dans la veine de flux est la plus faible.

Le point _____, pour lequel _____, est le point de _____. À cette incidence, le rapport entre portance et trainée est le plus intéressant :

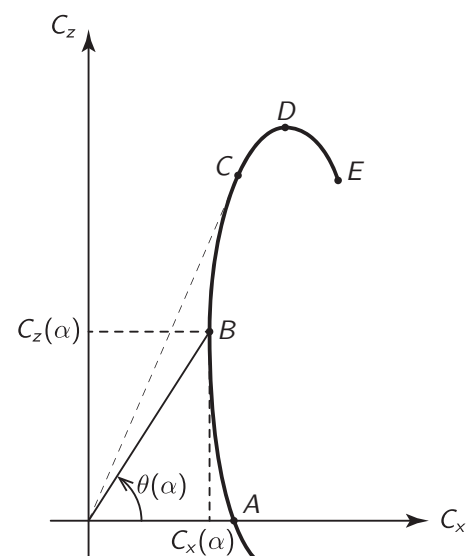


Figure 12 – Allure schématisée de la polaire d'une aile et définition de la finesse.

le profil d'aile donne ses meilleures performances aérodynamiques. Sur l'aile présentée sur la table 1, la meilleure finesse est obtenue pour une incidence de 4° et vaut 20.

Le point _____ correspond au point de _____. On va donc choisir une incidence proche de celle décrite par ce point si l'on souhaite gagner de l'altitude le plus rapidement possible. En effet, à cette incidence, la force de portance étant maximale, c'est dans cette configuration qu'il sera possible de « tirer efficacement l'avion vers le haut ». Malheureusement, au delà de cette incidence, la portance diminue à nouveau.

Le point _____ est le point de _____. Entre les points *D* et *E*, la trainée continue d'augmenter mais la portance diminue en raison du décollement des filets d'air sur l'extrados. L'écoulement d'air devient trop turbulent et la zone de dépression sur l'extrados perd de son efficacité pour créer la portance. À partir du point *E*, les filets d'air sont complètement décollés, l'aile n'est donc plus dans un flux d'air et elle ne porte plus du tout.

Par ailleurs, il est à noter que la finesse peut s'interpréter en d'autres termes. En effet, on peut montrer par une analyse physique du problème de chute libre que si l'on garde une trajectoire rectiligne et une vitesse constante le rapport $\frac{C_z}{C_x}$ correspond également au rapport $\frac{\text{distance parcourue}}{\text{hauteur perdue}}$. Ainsi, pour un vol plané (en planeur ou lors d'une panne de moteur), l'incidence de finesse maximale est également l'incidence permettant de parcourir la plus grande distance avant de toucher le sol.

Enfin, lorsque l'aile est fixée sur l'avion, le fuselage, les empennages, les moteurs et autres parties de l'avion vont ajouter des trainées supplémentaires. La courbe polaire de l'avion complet peut alors être déduite de la courbe polaire de l'aile par une translation dans le sens d'une augmentation du coefficient de trainée C_x . Le dessin de tous ces éléments sera donc particulièrement étudié (en forme et position notamment) pour réduire au minimum les trainées parasites.

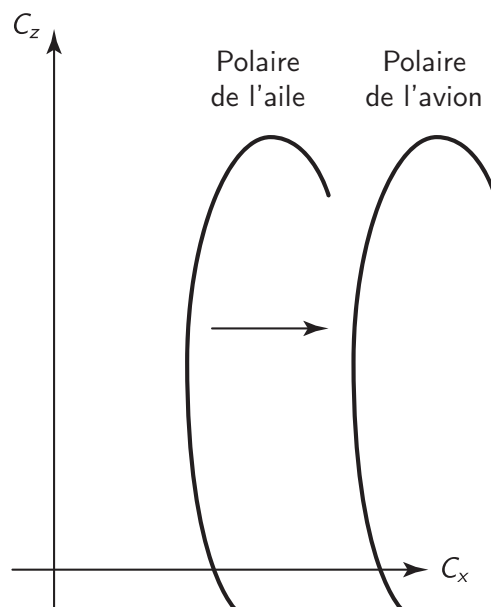


Figure 13 – De la polaire de l'aile à la polaire de l'avion.

2.3. Retour sur les caractéristiques de l'aile

La voilure a pour but d'assurer la sustentation de l'avion. La distance mesurée entre les extrémités des deux ailes s'appelle l'_____.

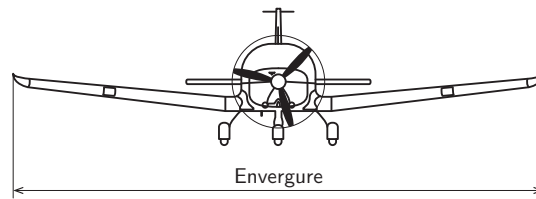


Figure 14 – Définition de l'envergure.

L'aile peut être raccordée au fuselage en différentes positions caractérisant une aile haute, médiane ou basse. Du point de vue du pilotage, un avion à aile haute aura tendance à être plus stable qu'un avion à aile basse dans la mesure où le centre de gravité de l'avion sera situé en dessous de l'aile. Du point de vue aérodynamique, toute la partie supérieure de l'aile étant présente, les ailes hautes fournissent généralement une meilleure portance notamment en basse vitesse. Cependant, les ailes hautes sont généralement source de trainées plus importantes que les ailes basses, ce qui se traduira généralement par des performances un peu moins bonnes pour des avions de motorisation semblable.

L'aile peut être dotée d'une forme particulière : en ellipse, trapèze, rectangle, flèche ou delta. L'angle de flèche, mesuré entre l'axe de tangage de l'avion et le bord d'attaque de l'aile augmente au fur et à mesure que les performances de l'avion lui permettent d'avoir des vitesses importantes. De cette manière, l'aile se retrouve petit à petit décalée vers l'arrière où elle pourra engendrer une portance plus élevée aux grandes vitesses.

Enfin, les performances de l'aile sont fortement impactées par la définition de son profil. Il est donc nécessaire de préciser certains éléments caractérisant le profil d'une aile. Ces éléments sont présentés sur la figure 15.

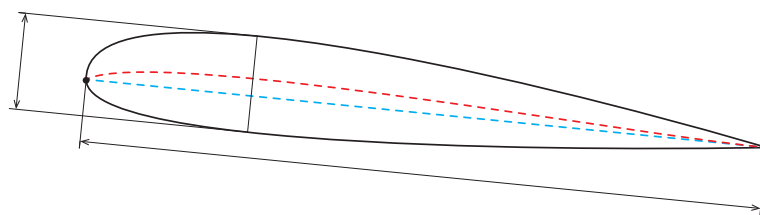


Figure 15 – Caractéristiques d'un profil d'aile.

Le _____ est le point le plus en avant du profil, tandis que le _____ est le point le plus en arrière du profil. Le segment de droite liant ces deux points est appelée la _____ du profil. On peut mesurer la longueur de la corde pour déterminer la _____ du profil.

Connaissant la profondeur de l'aile ainsi que son envergure, il est alors possible de définir son allongement $\lambda = \frac{E}{P}$. Si la profondeur de l'aile n'est pas définie clairement dans le manuel de vol, on peut utiliser la relation suivante pour définir l'allongement : $\lambda = \frac{E^2}{S}$ où S est la surface alaire de l'aile, c'est-à-dire la surface

de l'aile incluant le prolongement fictif de l'aile dans le fuselage.

Perpendiculairement à la corde, on mesure l'_____ du profil comme étant la plus grande distance entre l'extrados et l'intrados, étant rappelé que l'_____ est la partie supérieure de l'aile tandis que l'_____ est la partie inférieure de l'aile.

L'épaisseur peut également être exprimée en pourcentage de la profondeur. On parle alors d'épaisseur relative. Elle est de :

- moins de 6 % pour un profil qualifié de mince comme on pourrait en trouver sur les avions de chasse ;
- 6 % à 12 % pour un profil semi-épais d'avion de ligne ;
- supérieure à 12 % pour un profil épais d'avion de transport basse vitesse.

La _____ du profil est le segment de ligne joignant le bord d'attaque au bord de fuite en passant par les points situés à équidistance de l'extrados et de l'intrados.

Cette ligne moyenne permet d'identifier des grandes classes de profils.

Si la ligne moyenne est rectiligne, le profil sera qualifié de _____.



Figure 16 – Le profil rectiligne : le profil biconvexe symétrique.

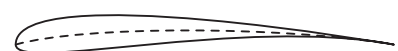
Si la ligne moyenne est à simple courbure, le profil peut être biconvexe dissymétrique (intrados et extrados convexes), plan convexe (intrados plan, extrados convexe) ou creux (intrados concave, extrados convexe).



(a) Profil biconvexe dissymétrique.



(b) Profil plan convexe.



(c) Profil creux.

Figure 17 – Les profils à simple courbure.

Si la ligne moyenne est à double courbure, le profil porte le même nom.



Figure 18 – Le profil à double courbure.

Le flux d'air attaque le profil dans une direction qui ne coïncide pas nécessairement à la corde de l'aile. L'angle d'_____ permet de mesurer l'angle entre la direction du flux d'air et la corde du profil. Conventionnellement, cet angle est positif lorsque l'air attaque l'aile par l'intrados, et négatif lorsque l'air attaque l'aile par l'extrados.

Afin de modifier les caractéristiques de l'aile, notamment du point de vue de la portance et de la trainée, il est possible d'installer des dispositifs hyper ou hyposustentateurs comme évoqué précédemment dans les paragraphes portant sur la portance et la trainée.

Les dispositifs hypersustentateurs sont les volets et les bords de bord d'attaque. Ces dispositifs permettent de modifier la portance et la trainée de la différentes façons :

- en augmentant la surface de l'aile, les forces de portance et de trainée augmentent puisque, par définition, l'intensité de ces forces est proportionnelle à la surface de l'aile ;
- en augmentant la courbure de l'aile, la différence de vitesse entre les filets d'air passant sur l'extrados et l'intrados augmente, ce qui se traduit par une augmentation de la portance ;

- dans le même temps, une augmentation de la courbure de l'aile se traduit également par une augmentation de son épaisseur, fortement liée à la trainée produite ;
- enfin, en ajoutant des interstices entre les différentes parties de l'aile (bec, aile, volet), il est possible d'accélérer localement un petit flux d'air qui permettra de recoller les filets d'air ayant tendance à devenir turbulent autrement, ce qui se traduit par une amélioration de la portance notamment à basse vitesse.

Les dispositifs hyposustentateurs sont les aérofreins. Ces dispositifs permettent généralement de modifier la portance et la trainée de la façon suivante :

- en plaçant un obstacle (généralement sur l'extrados de l'aile), le vitesse d'écoulement est cassée, conduisant une réduction importante de la portance ;
- en revanche, le déploiement de cet obstacle augmente l'épaisseur de l'aile, ce qui se traduit pas une augmentation de la trainée.

3. Mécanique du vol

3.1. Équilibre, stabilité et maniabilité de l'aéronef

En vol, un aéronef est soumis aux effets de quatre forces :

- les deux forces de portance et de trainée dont nous avons parlé précédemment ;
- deux autres forces qui vont s'opposer à la portance et à la trainée : le poids et la traction (ou la poussée) respectivement.

Lors d'un vol en palier, la portance équilibre le poids tandis que la traction équilibre la trainée. Pour les autres phases de vol, les équilibres entre les différentes forces sont modifiés pour permettre à l'aéronef de monter ou de descendre. Nous étudierons de manière approfondie dans les sections suivantes les différentes phases de vol mais dans un premier temps nous allons caractériser de manière un peu plus détaillée les forces appliquées sur l'avion, notamment pour ce qui est de leurs points d'application et de l'effet de la position de ces points sur l'équilibre de l'avion en terme de stabilité ou de maniabilité.

L'action mécanique de pesanteur, le poids, s'applique sur l'avion au niveau d'un point appelé _____ ou _____. Selon le principe d'inertie, c'est ce point particulier de l'avion qui tend à suivre une trajectoire rectiligne uniforme. Ainsi, lorsque l'avion est entraîné en rotation par les actions du pilote, ces mouvements de rotation s'effectuent autour du centre de gravité.

La position du centre de gravité dépend de la répartition de masse dans l'avion. Elle évolue donc d'un vol à l'autre en fonction du chargement de l'avion (nombre et répartition des passagers, bagages) mais également entre le début et la fin du vol en raison de la consommation d'essence durant le vol.

La force aérodynamique de portance est créée en tout point autour de l'aile en raison de l'écoulement de l'air mais on peut, pour simplifier l'analyse du problème, associer toutes ces forces élémentaires en une force unique de portance appliqué en un point que l'on appelle _____.

La position du centre de poussée dépend de plusieurs paramètres dont :

- le type de profil d'aile ;
- l'allongement : si l'allongement augmente, le centre de poussée se rapproche du bord d'attaque ;
- l'angle d'incidence : si l'angle d'incidence augmente, le centre de poussée se rapproche également du bord d'attaque.

Le centre de poussée est généralement situé en avant du centre de gravité.

La conséquence de la position du centre de poussée par rapport au centre de gravité est une stabilité incertaine de l'avion. En effet, comme on peut le voir sur la figure 19, l'action de l'effort de portance en avant du centre de gravité se traduit par l'apparition d'un moment résultant ayant tendance à lever le nez de l'avion.

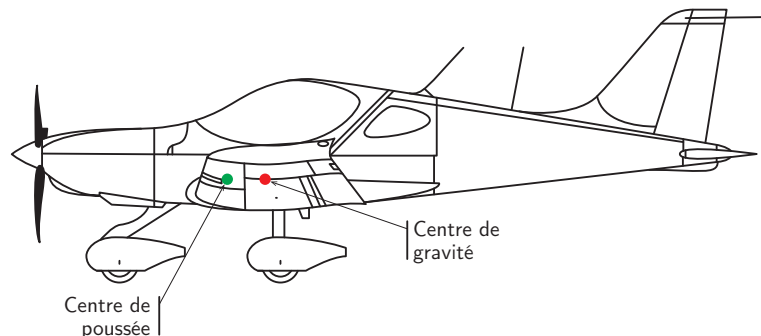


Figure 19 – Déséquilibre de l'avion soumis à son poids et à la force de portance créée par l'aile.

Pour équilibrer l'avion, celui-ci est équipé d'une gouverne de profondeur qui se comporte comme une aile et engendre une force de portance. On peut donc définir pour la gouverne de profondeur comme pour l'aile un centre de poussée. La figure 20 montre alors la coordination de la portance de la gouverne de profondeur et de l'aile pour assurer l'équilibre de l'avion.

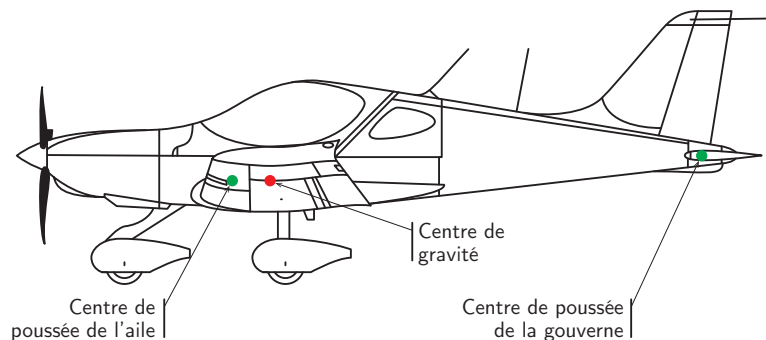


Figure 20 – Équilibre de l'avion soumis à son poids et aux forces de portance créée par l'aile et par la gouverne de profondeur.

Enfin, si la position du centre de poussée est variable, on peut montrer expérimentalement et théoriquement qu'il existe un point pour lequel quelle que soit l'incidence, la force aérodynamique aura toujours la même capacité à faire tourner l'avion autour du centre de gravité. Ce point particulier est appelé _____. Ce point peut alors se concevoir comme le point d'application des _____.

À l'inverse des autres points, la position du foyer est relativement fixe par rapport à l'avion. Si l'on recherche la position du foyer global de l'avion (dû aux forces de portance de l'aile et de la gouverne de profondeur), on remarque que le foyer avion est généralement situé en arrière du centre de gravité de l'avion.

La position du foyer avion en arrière du centre de gravité est alors un facteur de stabilité de l'avion. En effet, si l'incidence augmente sous l'effet d'une rafale de vent par exemple, la variation de portance peut être considérée comme appliquée au foyer avion et ce nouvel effort engendre l'apparition d'un moment autour du centre de gravité ayant tendance à ramener l'avion sur sa ligne de vol initiale.

Une opération cruciale dans le pilotage d'un avion est la vérification du _____ de l'avion.

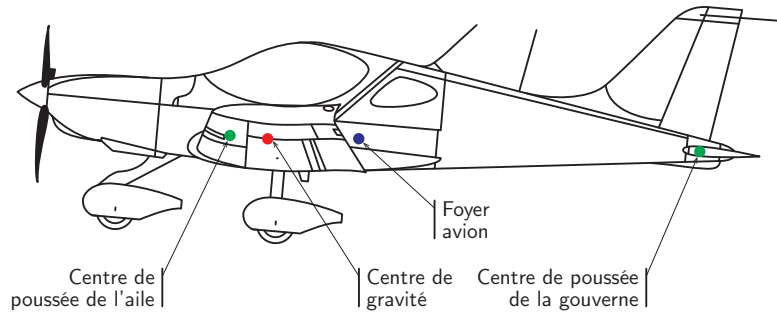


Figure 21 – Stabilité de l'avion lors d'une augmentation de l'incidence.

Comme vu précédemment, la position du centre de gravité est variable dans l'avion tandis que la position du foyer est fixe. Or, c'est cette distance entre centre de gravité et foyer qui permet d'équilibrer naturellement l'avion. La stabilité de l'avion peut donc s'évaluer directement à partir de la distance entre le centre de gravité et le foyer :

- si cette distance augmente, la stabilité de l'avion augmente ;
- si cette distance diminue, la stabilité de l'avion diminue.

Par opposition :

- si la stabilité augmente, la maniabilité diminue ;
- si la stabilité diminue, la maniabilité augmente.

On constate dans la pratique qu'il existe des limites à la position du centre de gravité. En effet, si le centre de gravité est situé trop loin en avant du foyer la stabilité devient trop grande, l'avion n'est plus manœuvrable. À l'inverse, si le centre de gravité est situé trop près du foyer l'équilibre ne peut plus se faire, l'avion devient trop maniable et instable.

On trouve donc dans le manuel de vol de chaque avion les limites avant et arrière de position du centre de gravité et il revient au pilote de vérifier que la position des passagers et du chargement permet de respecter le centrage de l'avion.

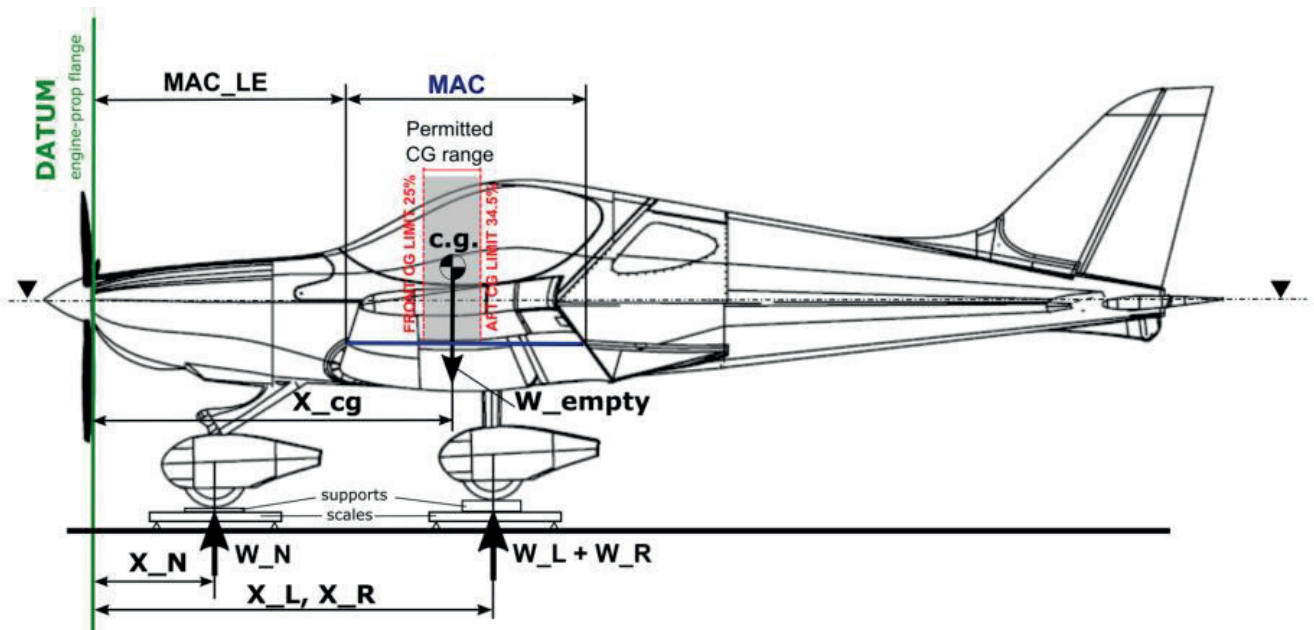


Figure 22 – Extrait du manuel de vol du Bristel B23 déterminant les limites de centrage de l'avion.

3.2. Relation assiette, pente, incidence

Si on considère un avion en vol, on peut définir trois angles importants liés entre eux par une relation simple :

- l'_____ de l'avion est l'angle formé entre l'axe longitudinal de l'avion et l'horizontale, elle est définie positivement si le nez de l'avion se situe au dessus de l'horizon ;
- la _____ est l'angle formé entre la trajectoire suivie par l'avion et l'horizontale, elle est définie positivement si l'avion est en montée ;
- l'_____ est l'angle formé entre l'axe longitudinal de l'avion et la trajectoire, elle est définie positivement si le nez de l'avion est au dessus de la trajectoire.

La relation reliant ces trois paramètres est la suivante :

$$\text{Assiette} = \text{Pente} + \text{Incidence}$$

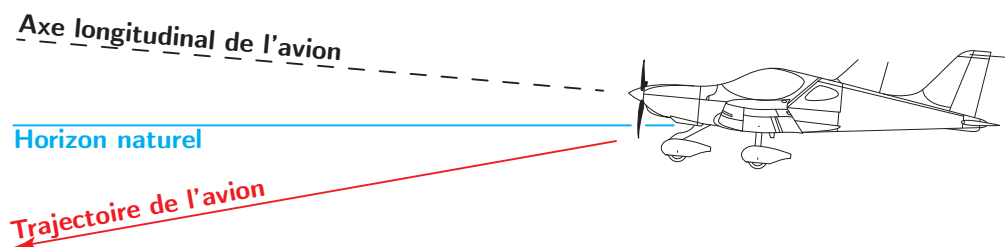


Figure 23 – Relation entre assiette, pente et incidence.

3.3. Étude du vol stabilisé

L'étude du vol stabilité consiste à analyser les forces s'appliquant à un aéronef en vol. Ces forces peuvent être regroupées en fonction de leur origine :

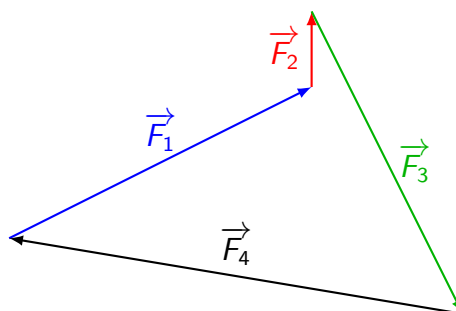
- origine inertielle, fonction des accélérations subies par l'avion ;
- origine propulsive, générées par les moteurs de l'avion ;
- origine aérodynamique, générées par le flux d'air s'écoulant autour des ailes.

Nous allons donc nous intéresser dans cette partie aux effets de ces forces au niveau du centre de gravité de l'avion. Si l'avion effectue un vol rectiligne uniforme (en se déplaçant en ligne droite à vitesse constante) le principe fondamental de la dynamique nous indique que la somme des forces qui lui sont appliquées est nulle :

$$\sum \vec{F}_G = \vec{0}$$

Remarque :

La relation précédente signifie que les flèches représentant les forces mises bout à bout reviennent au point de départ :



Dans les paragraphes qui suivent, nous allons considérer, pour simplifier les études, que le centre de poussée et le centre de gravité sont confondus et appartiennent à l'axe longitudinal de l'avion.

3.3.1. Vol plané

Le planeur n'ayant pas de moteur, son seul mouvement possible est un mouvement de descente par rapport à la masse d'air dans laquelle il se trouve. Seule la présence de courants ascendants peut lui permettre de prendre de l'altitude.

On considère un planeur en descente rectiligne à vitesse constante, en air calme, qui suit une pente de descente γ . Ce planeur est soumis aux deux seules forces que sont son poids et la résultante aérodynamique.

Comme nous l'avons vu précédemment, la résultante aérodynamique peut être décomposée en deux éléments : la portance, perpendiculaire à l'axe de l'aéronef et la traînée, parallèle à l'axe de l'avion.

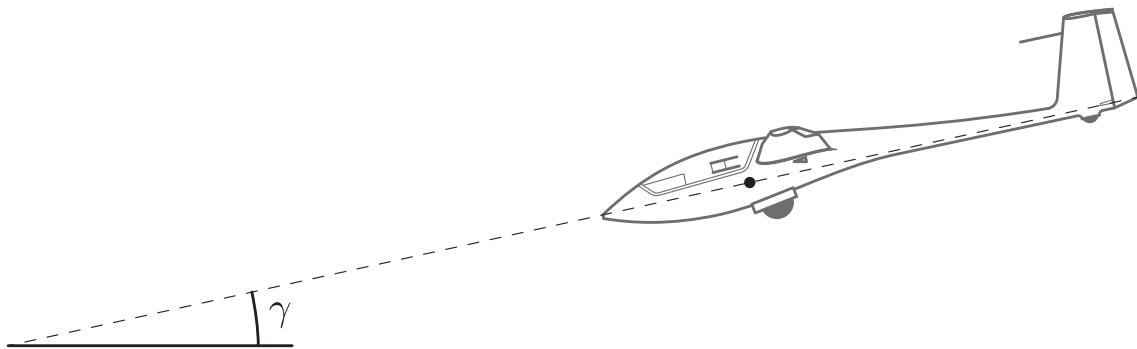


Figure 24 – Équilibre du planeur en descente.

Pour étudier l'équilibre des forces, on peut également décomposer le poids en deux composantes : l'une opposée à la portance, l'autre opposée à la traînée. On obtient alors les deux relations suivantes :

$$\begin{cases} F_z = m g \cos \gamma \\ F_x = m g \sin \gamma \end{cases}$$

La pente de descente étant généralement faible, on peut simplifier ces deux expressions en considérant $\cos \gamma \approx 1$ et $\sin \gamma \approx \gamma$. Ceci permet alors d'écrire

$$\begin{cases} F_z = m g \\ F_x = m g \gamma \end{cases} \implies F_x = F_z \gamma \implies \gamma = \frac{F_x}{F_z} = \frac{1}{f}$$

On retrouve alors ici la relation entre la pente de descente γ et la finesse f de l'avion : plus la finesse d'un avion ou d'un planeur est grande, plus sa pente de descente est faible.

3.3.2. Vol motorisé

Lors du vol d'un avion par opposition au vol d'un planeur, une quatrième force vient s'ajouter à la portance, la trainée et le poids : il s'agit de la traction, que l'on notera T .

Remarque : pour des soucis de simplicité nous utiliserons ici systématiquement le terme de traction adapté aux avions à hélice. Pour un avion à réaction on utilise plutôt le terme de poussée.

Vol en palier rectiligne uniforme

Dans le cas du vol en palier uniforme, les quatre forces évoquées précédemment s'équilibrent deux à deux :

- l'avion vole à altitude constante donc la portance doit équilibrer le poids : $F_z = P$;
- l'avion vole à vitesse constante donc la traction équilibre la trainée $T = F_x$.

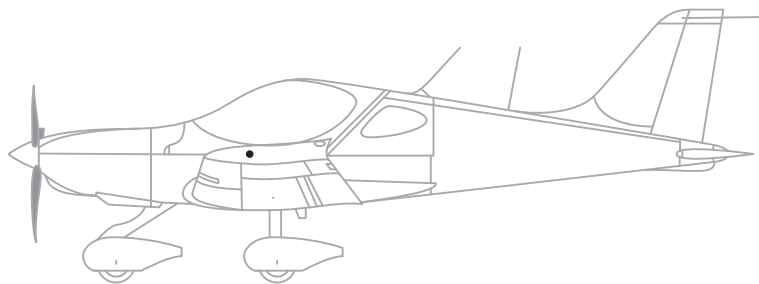


Figure 25 – Équilibre de l'avion en palier uniforme.

Se souvenant des expressions de la force de portance et de la force de trainée, on peut en déduire

$$\begin{cases} mg = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_z \\ T = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_x \end{cases} \implies \frac{mg}{T} = \frac{C_z}{C_x} \implies T = \frac{mg}{f}$$

On constate alors avec cette dernière expression que, la masse étant globalement constante, pour qu'un avion vole en palier à vitesse constante il n'existe qu'une seule valeur de C_z permettant d'équilibrer le poids, donc qu'une seule valeur d'incidence permettant de maintenir le palier.

De fait, il n'existe également qu'une seule valeur de C_x , ce qui impose la force de traction qu'il faut appliquer avec le moteur. On voit donc ici que les deux équations de sustentation et de propulsion sont intimement liées.

Vol en montée rectiligne uniforme

Pour que l'avion effectue une montée à vitesse constante, nous allons voir ici que la force de traction doit augmenter par rapport au vol en palier, ce qui semble tout à fait naturel.

Si l'avion monte en suivant une trajectoire de pente γ , on peut décomposer son poids en deux parties, l'une parallèle à la trajectoire et s'ajoutant à la force de trainée et l'autre perpendiculaire à la trajectoire et s'opposant à la force de portance.

Compte tenu de la décomposition proposée pour l'effort de pesanteur, on peut écrire

$$\begin{cases} F_z = mg \cos \gamma \\ T = F_x + mg \sin \gamma \end{cases}$$

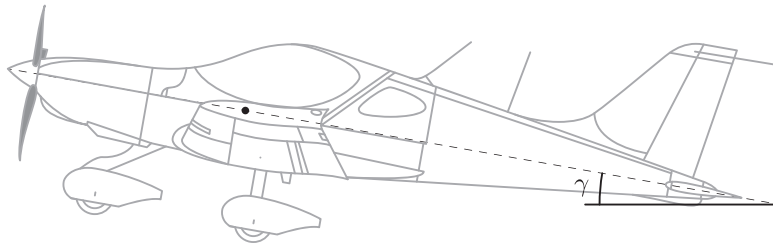


Figure 26 – Équilibre de l'avion en montée.

et comme pour la descente en vol plané, si on considère la pente γ faible, on peut proposer les simplifications suivantes :

$$\begin{cases} F_z = m g \\ T = F_x + m g \gamma \Rightarrow \gamma = \frac{T - F_x}{m g} \end{cases}$$

Cette dernière expression s'interprète de manière tout à fait intuitive :

- plus la traction est performante, plus la pente pourra être forte ;
- plus les frottements aérodynamiques sont importants, plus la pente sera faible ;
- plus la masse de l'avion est importante, plus la pente sera faible.

Vol en descente rectiligne uniforme

En descente à vitesse constante à l'inverse, il est nécessaire de diminuer la traction pour garder une vitesse constante. Là encore, ceci semble tout à fait logique.

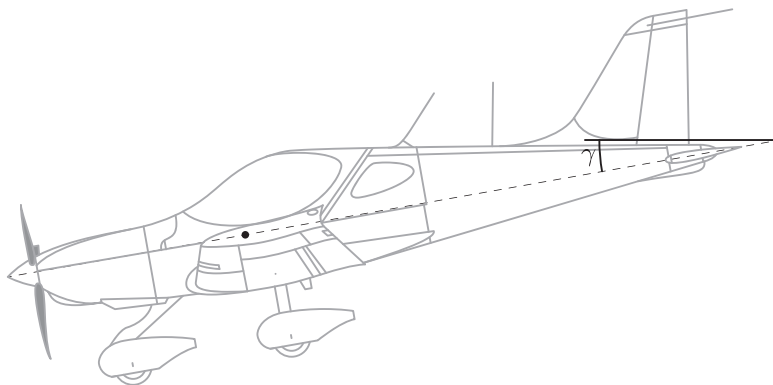


Figure 27 – Équilibre de l'avion en montée.

Cette fois-ci, la composante du poids parallèle à la trajectoire s'ajoute à la traction, ce qui permet d'écrire, en considérant toujours la pente γ :

$$\begin{cases} F_z = m g \cos \gamma \\ T + m g \sin \gamma = F_x \end{cases}$$

et en effectuant toujours la même simplification

$$\begin{cases} F_z = m g \\ T + m g \gamma = F_x \Rightarrow \gamma = \frac{F_x - T}{m g} \end{cases}$$

Remarque : lorsque le moteur de l'avion est au ralenti, on peut considérer que la traction T s'annule et les équations redeviennent celles du planeur. Cependant, l'hélice de l'avion, lorsqu'elle n'est plus entraînée par le moteur, est une importante source de trainée.

Vol en virage symétrique en palier

Lorsqu'un avion vole en virage symétrique en palier et à vitesse constante, il s'incline autour de son axe de roulis. malgré ce mouvement, la force de portance reste perpendiculaire au plan des ailes.

La première conséquence de l'inclinaison de la force de portance et l'apparition d'une composante horizontale de la portance. Cette composante horizontale dirigée vers l'intérieur du virage permet de dévier la trajectoire de l'avion vers l'intérieur.

Mais si la force aérodynamique s'incline vers l'intérieur, cela signifie aussi que sa composante verticale diminue. Ainsi, sans action du pilote, la composante verticale de la portance n'équilibre plus le poids et l'avion s'engage naturellement en descente lors d'un virage.

Pour effectuer un virage en palier il est donc nécessaire d'augmenter légèrement la portance. On pourra faire cela en augmentant l'incidence mais ceci augment également la trainée et doit donc être accompagné d'une hausse de puissance.

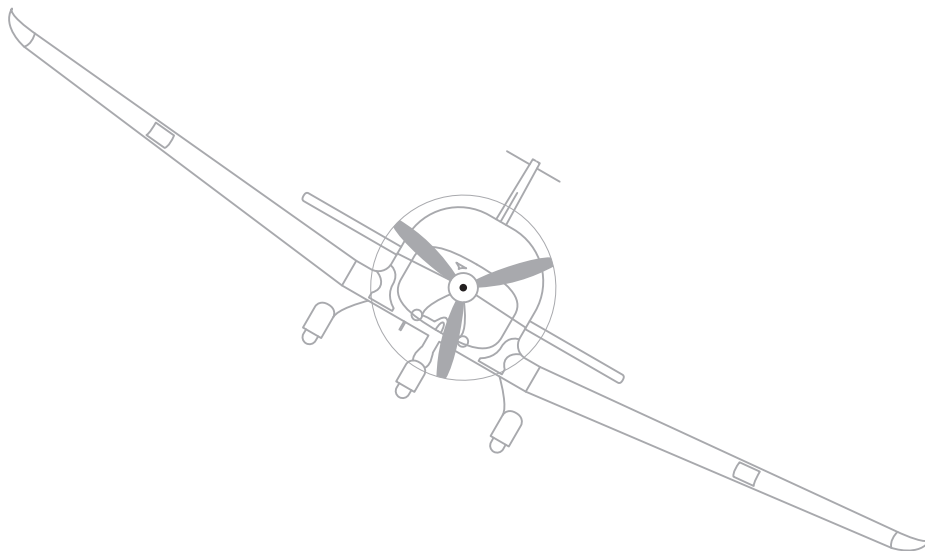


Figure 28 – Équilibre de l'avion en virage.

Par ailleurs, pour le pilote, une sensation de lourdeur apparaît lors d'un virage. En effet, en vol en palier, nous avons vu que la portance équilibre exactement le poids. Or, en vol en palier, la portance est verticale et vers le haut. Cette habitude étant ancrée en nous, lors d'un virage en avion, notre poids « reste » l'effort équilibrant la portance de sorte que nous avons l'impression qu'il augmente.

En notant φ l'inclinaison de l'avion lors du virage, on peut remarquer que le poids apparent peut se déterminer à partir du poids réel :

$$\text{poids réel} = \text{poids apparent} \times \cos \varphi \Rightarrow \text{poids apparent} = \frac{\text{poids réel}}{\cos \varphi}$$

Le cosinus étant par définition inférieur à 1, notre poids semble plus important en virage qu'en vol en ligne droite.

On peut alors définir le _____ comme étant le rapport entre la portance et le poids (réel) de l'avion. Le facteur de charge est généralement noté n :

$$n = \frac{F_z}{m g}$$

En virage, nous venons de voir que la portance doit augmenter pour valoir $F_z + \Delta F_z$, de sorte que

$$n = \frac{F_z + \Delta F_z}{m g} = \frac{\text{poids apparent}}{m g} = \frac{\text{poids réel}}{\cos \varphi m g} = \frac{1}{\cos \varphi}$$

On rappelle que lors de la présentation des instruments de bords, l'indicateur de virage, outre l'indication du côté de virage et du taux de virage, indique également la symétrie à l'aide de l'indicateur de dérapage ou bille.

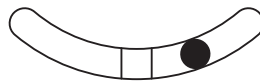


Figure 29 – Bille non centrée nécessitant une action à droite sur le palonnier.

Celle-ci doit être centrée pour avoir un virage symétrique et on retiendra qu'il faut agir sur le palonnier du côté où est la bille pour la placer au centre de l'indicateur de dérapage.

4. Le vol spatial

On peut définir l'espace comme l'environnement sans limite situé autour de la Terre. Si cet environnement est régi par des lois physiques et mécaniques connues, la découverte et l'exploration de cet environnement est source de curiosité pour l'homme qui a lancé dans l'espace divers objets d'observation, d'étude et d'analyse : les sondes et les satellites.

Pour comprendre le fonctionnement des satellites mis en orbite, il est nécessaire d'avoir quelques notions à propos des lois de la physique.

4.1. Loi de la gravitation universelle

Le vol spatial repose essentiellement sur l'utilisation de la force de gravitation. Le mathématicien et physicien _____ démontra que dans tous l'univers, _____



Figure 30 – La force d'attraction universelle.

L'intensité de cette force est déterminée par la relation

$$F_{1 \rightarrow 2} = -F_{2 \rightarrow 1} = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

où

- $F_{1 \rightarrow 2}$ est la force d'attraction exercée par le corps 1 sur le corps 2, exprimée en N ;
- $F_{2 \rightarrow 1}$ est la force d'attraction exercée par le corps 2 sur le corps 1, exprimée en N ;
- G est le coefficient de gravitation universel ($G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$) ;
- M_1 et M_2 sont les masses des corps 1 et 2, exprimées en kg ;
- r est la distance séparant les deux centres de gravités G_1 et G_2 des deux corps, exprimée en m.

Cette force d'attraction est généralement appelée _____ et l'on retrouve la formulation suivante :

$$P = m \cdot g_0 \quad \text{avec} \quad g_0 = G \frac{M_T}{R_0^2} = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

où M_T est la masse de la Terre et R_0 son rayon.

Sous l'effet de l'attraction universelle, deux corps dans l'espace ont donc tendance à s'attirer l'un l'autre de sorte que si on lance un projectile à la surface de la Terre, il finit par retomber au sol. Cependant, Isaac Newton imagine un canon placé au sommet d'une très haute montagne et permettant de lancer le projectile avec une vitesse horizontale très grande.

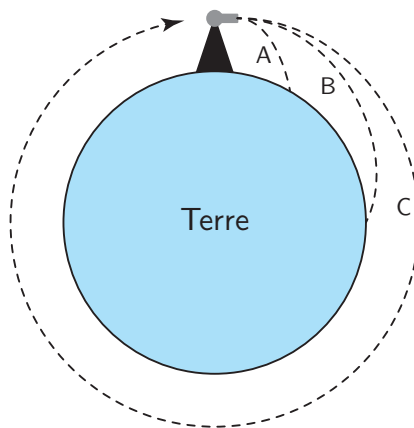


Figure 31 – Expérience de pensée d'Isaac Newton : le lancement d'un satellite.

Si le projectile est lancé à faible vitesse (trajectoires A ou B sur la figure 31), le projectile finit par retomber au sol comme on peut l'expérimenter chaque jour.

Mais Isaac Newton entrevoit le fait que si le projectile est lancé suffisamment vite, il pourrait « rater la Terre au moment d'y retomber » (trajectoire C sur la figure 31). Ainsi, le projectile pourrait « tomber en permanence sur la terre ». On parle alors d'orbite pour décrire le mouvement du projectile autour de la Terre. La vitesse permettant de mettre le satellite en orbite est appelée **vitesse d'injection**.

Et si la vitesse augmente, il est possible d'arracher un objet à l'attraction terrestre. On parle alors de **libération**.

4.2. Lois de Kepler

En étudiant le déplacement des astres évoluant en orbite autour d'autres astres, l'astronome _____ remarque que les mouvements de ces astres respectent trois règles fondamentales :

- **première loi, dite des orbites** : un corps orbite autour d'un autre corps en suivant une trajectoire elliptique dont un des foyer est occupé par le corps central ;
- **deuxième loi, dite des aires** : les aires balayées par le segment joignant le centre de l'astre et le centre du satellite dans des intervalles de temps égaux sont égales ;
- **troisième loi, dite des périodes** : la période de révolution d'un satellite est directement liée au cube du demi grand-axe de sa trajectoire.

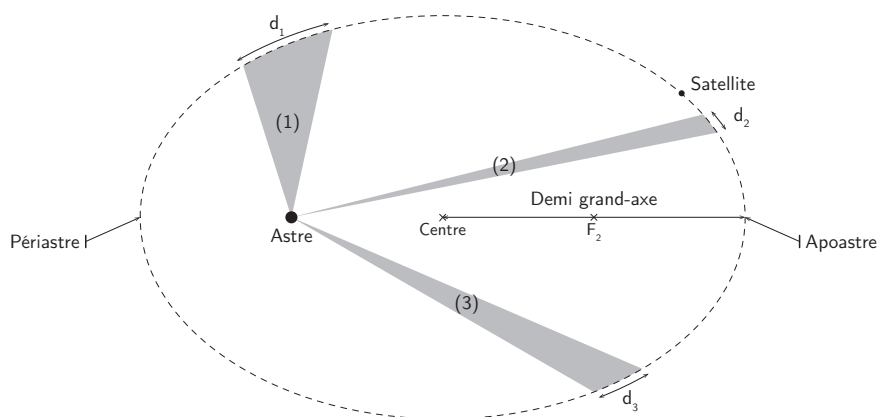


Figure 32 – Les lois de Kepler.

Sur la figure 32 page suivante, les trois distances d_1 , d_2 et d_3 sont parcourues pendant le même intervalle de temps et les aires (S_1) , (S_2) et (S_3) sont égales. On constate alors qu'un objet céleste se déplace d'autant plus rapidement qu'il est proche de l'objet autour duquel il orbite.

De cette observation découle le fait qu'à une hauteur donnée ne correspond qu'une et une seule vitesse et inversement. Ceci pourrait être démontré mais cela ne fait pas l'objet de ce cours.

4.3. Les orbites

La plus grande difficulté lors de l'envoi d'un satellite dans l'espace est d'atteindre la vitesse d'injection permettant de le placer en orbite autour de la Terre. Ceci est d'autant plus compliqué que la Terre est entourée d'une atmosphère dans laquelle le déplacement des satellites est soumis à des frottements importants.

Ainsi, pour envoyer un objet dans l'espace, on procède généralement par accélération successives.

Le lancement initial a pour objectif de permettre à la sonde de sortir suffisamment de l'atmosphère pour que les frottements deviennent faibles. Après la première combustion on laisse la sonde évoluer en chute libre jusqu'à ce qu'elle atteigne son apogée.

Au moment de l'apogée, une seconde combustion accélère la sonde de manière à augmenter l'altitude de son périogée, ce qui aura pour effet de placer la sonde sur une orbite basse d'où il sera possible de passer sur une orbite elliptique de transfert.

L'accélération suivante permettra de redéfinir l'apogée puis, au prochain apogée, une nouvelle accélération permettra à nouveau de circulariser l'orbite.

Une orbite est alors définie par quatre paramètres :

- sa période orbitale (le temps nécessaire pour effectuer un tour d'orbite) ;

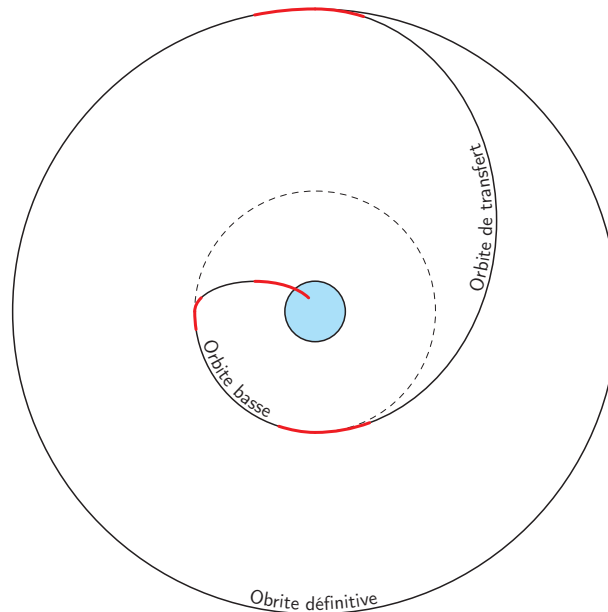


Figure 33 – Principe de lancement d'un satellite.

- les hauteurs de son périastre et de son apoastre ;
- son inclinaison par rapport à l'équateur de son astre (égale à 0° pour une orbite équatoriale et à 90° pour une orbite polaire) ;
- l'argument du périastre (décrivant la position du périastre sur les 360° de l'orbite).

En fonction de ces paramètres, on peut alors définir quelques grands types d'orbites.

Une orbite _____ est une orbite sur laquelle un satellite possède une période orbitale de 24 h sans que l'orbite ne soit circulaire. Ainsi, le satellite géosynchrone se déplace légèrement par rapport à la surface de la Terre mais les hauteurs du périastre et de l'apoastre lui permettent de revenir au dessus du même point après une orbite complète.

Une orbite _____ est une orbite géosynchrone circulaire équatoriale. Le périastre et l'apoastre étant égaux, la vitesse de déplacement du satellite est constante sur l'orbite et le satellite reste constamment au dessus du même point de la surface terrestre.

Une orbite _____ est une orbite dont l'inclinaison est proche de 90° . Sur une orbite polaire, le satellite passe régulièrement au dessus des pôles nord et sud. Ces orbites sont intéressantes d'une part pour observer les pôles difficilement visibles depuis une orbite géostationnaire, et d'autre part pour balayer la surface de la terre au fur et à mesure de sa rotation.

Une orbite _____ est une orbite sur laquelle le satellite passe toujours à la même heure solaire au dessus d'un point de la terre. Ces orbites sont intéressantes pour les observations et les prises de vues car l'éclairement du point considéré est toujours le même à chaque passage.

Enfin, on peut classer les orbites en fonction de leur hauteur :

- basse si la hauteur est comprise entre 160 km et 2000 km ;
- moyenne si la hauteur est comprise entre 2000 km et 35 786 km (correspondant à la hauteur géosynchrone) ;
- haute si la hauteur est supérieure à 35 786 km.

Ces valeurs sont bien sûr données pour la terre car selon la masse du corps principal la hauteur synchrone pourra varier significativement, et on place généralement la limite entre les orbites basses et moyennes à la limite de l'atmosphère (même si ce point est difficile à déterminer).