

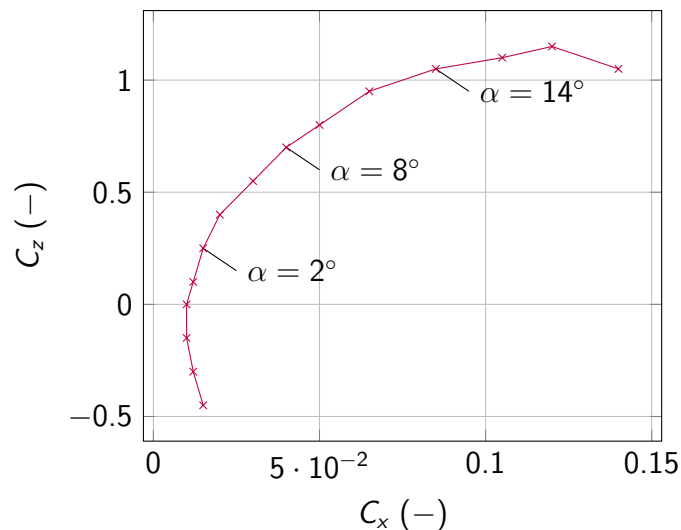


Figure 11 – Evolution des coefficients de portance C_z et de trainée C_x en fonction de l'incidence α .

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 :

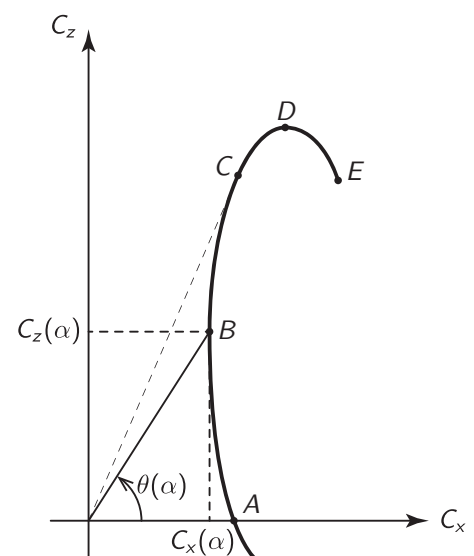


Figure 12 – Allure schématisique de la polaire d'une aile et définition de la finesse.

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.

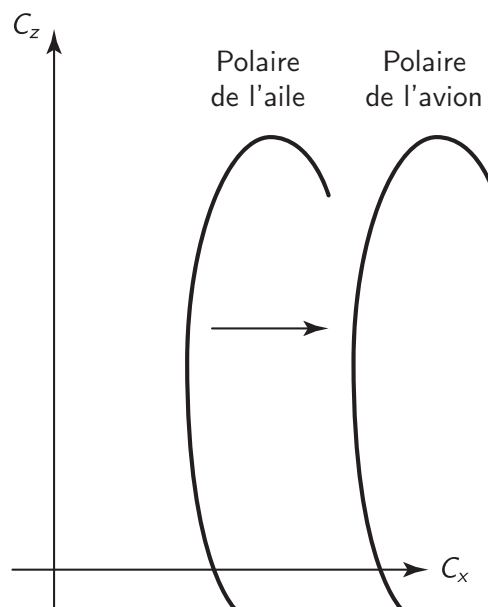


Figure 13 – De la polaire de l'aile à la polaire de l'avion.

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'_____.

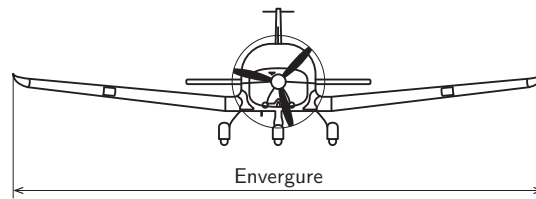


Figure 14 – Définition de l'envergure.

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.

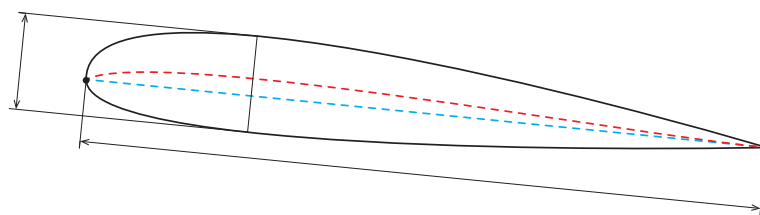


Figure 15 – Caractéristiques d'un profil d'aile.

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.

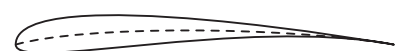
Si la ligne moyenne est à simple courbure, le profil peut être biconvexe dissymétrique (intrados et extrados convexes), plan convexe (intrados plan, extrados convexe) ou creux (intrados concave, extrados convexe).



(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.

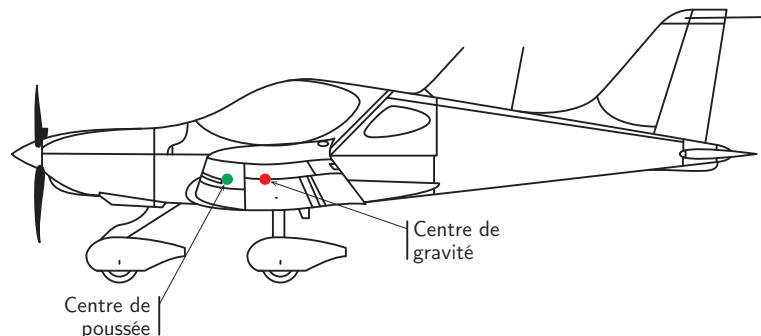


Figure 19 – Déséquilibre de l'avion soumis à son poids et à la force de portance créée par l'aile.

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.

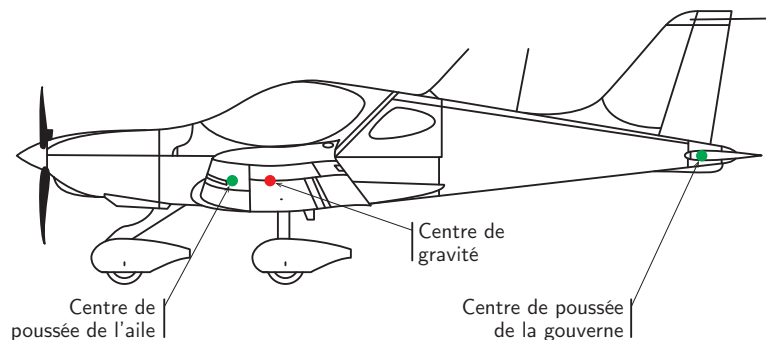


Figure 20 – Équilibre de l'avion soumis à son poids et aux forces de portance créée par l'aile et par la gouverne de profondeur.

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.

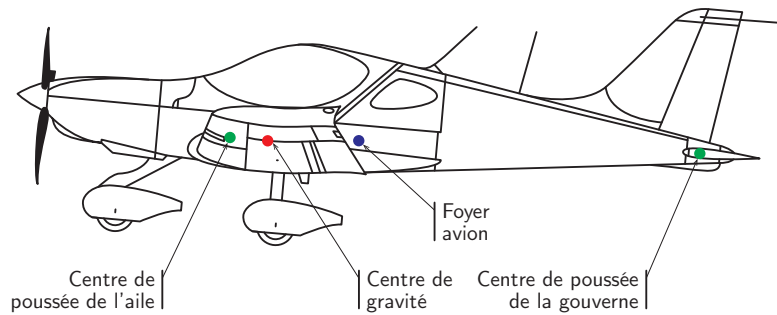


Figure 21 – Stabilité de l'avion lors d'une augmentation de l'incidence.

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.

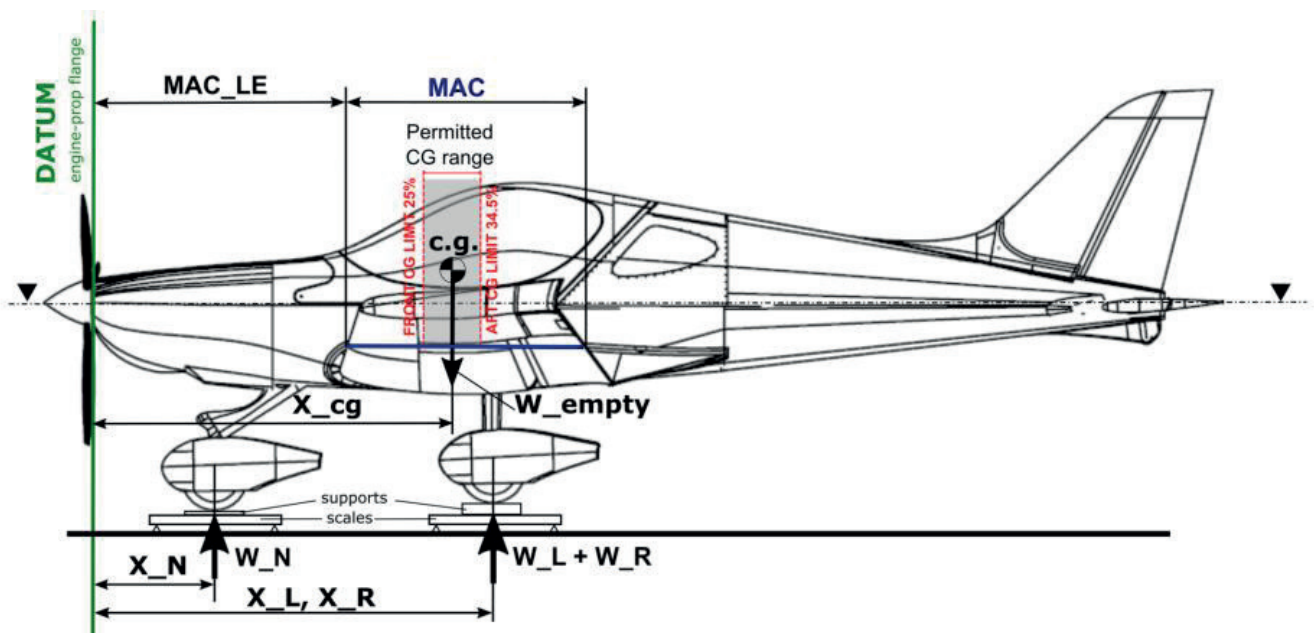


Figure 22 – Extrait du manuel de vol du Bristol B23 déterminant les limites de centrage de l'avion.