

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.

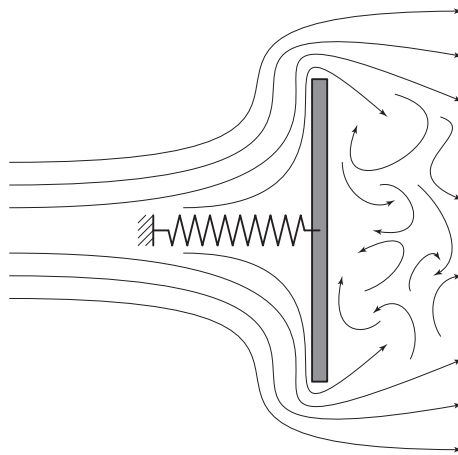


Figure 3 – Écoulement de l'air autour d'une plaque perpendiculaire à l'écoulement.

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.

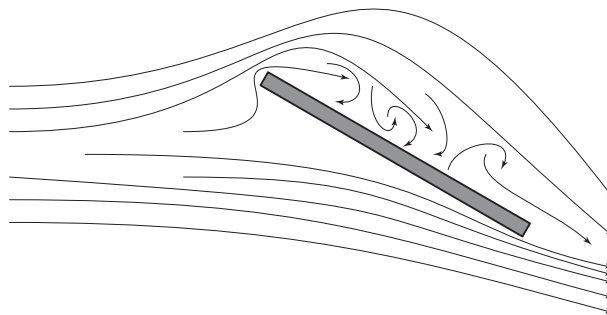


Figure 4 – Écoulement de l'air autour d'une plaque inclinée par rapport à l'écoulement.

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.

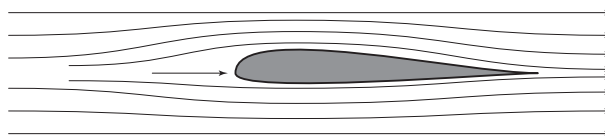


Figure 6 – Écoulement de l'air autour d'une aile parallèle à l'écoulement.

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.

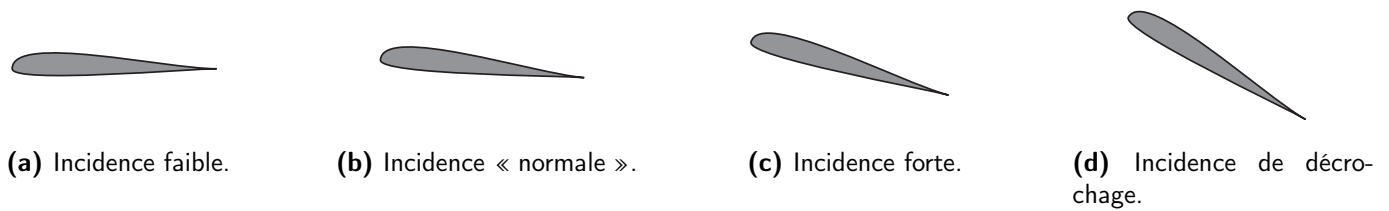


Figure 7 – Influence de l'incidence sur l'effort aérodynamique.

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 :

$$F_x =$$

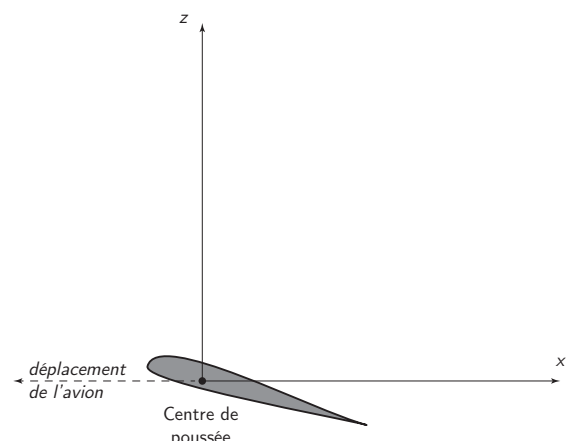


Figure 8 – Décomposition de la résultante aérodynamique.

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 .

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.

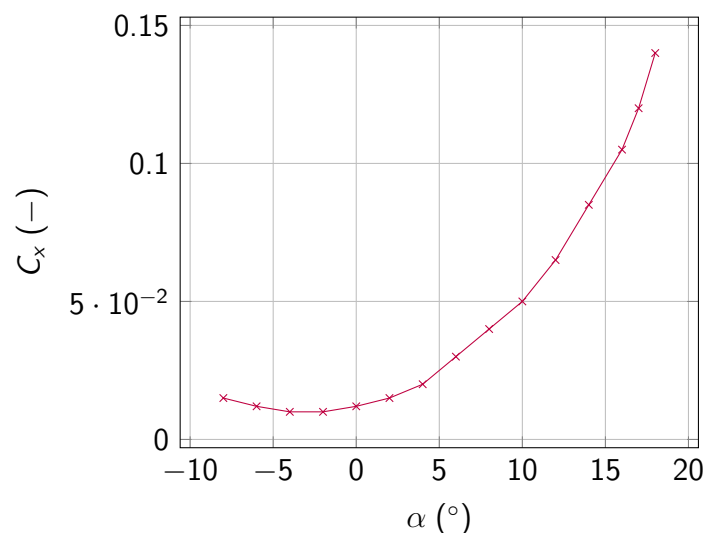


Figure 9 – Evolution du coefficient de trainée C_x en fonction de l'incidence α .

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.

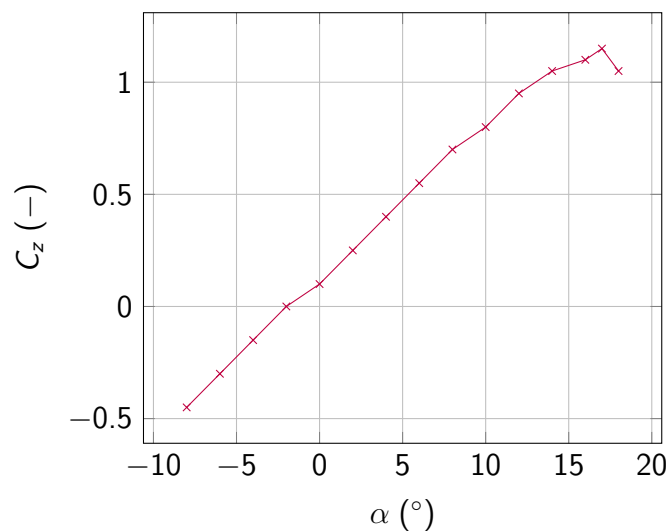


Figure 10 – Evolution du coefficient de portance C_z en fonction de l'incidence α .

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.