AERODYNAMIQUE ET MECANIQUE DU VOL

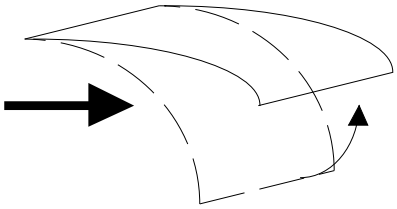
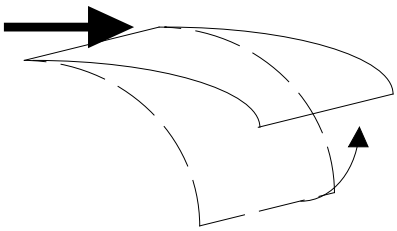
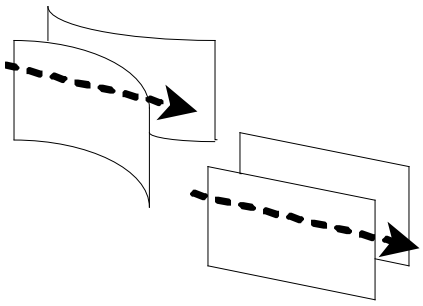
1 LES FORCES AERODYNAMIQUES 3
1.1 Les actions de l'air en écoulement 3
1.2 Etude de la portance 4
1.2.1 Influence de la forme du profil 4
1.2.2 Les profils d'aile 5
1.2.3 Influence de la vitesse 6
1.2.4 Influence de l'angle d'incidence 7
1.2.5 Expression de la portance 9
1.3 Etude de la traînée 9
1.3.1 Les différentes traînées 9
1.3.2 Influence de la forme 10
1.3.3 Influence de la vitesse 11
1.3.4 Influence de l'incidence 11
1.3.5 Influence de l'allongement 12
1.3.6 Expression de la traînée 12
2 UTILISATION DES FORCES AERODYNAMIQUES POUR LE CONTROLE DE LA TRAJECTOIRE 13
2.1 Le contrôle du tangage 13
2.2 Le contrôle du roulis 14
2.3 Le contrôle du lacet 16
3 ETUDE DES POLAIRES 17
3.1 Généralités sur les polaires 17
3.2 Etude de la polaire de type EIFFEL 18
3.3 Etude de la polaire des vitesses 19
4 LES PRINCIPALES PHASES DU VOL 19
4.1 Les axes et les angles de la mécanique du vol 19
4.2 Le vol rectiligne uniforme en palier 20
4.3 La montée rectiligne uniforme 21
4.4 La descente rectiligne uniforme 22
4.5 Le virage symétrique en palier à vitesse constante 22
4.6 Le vol plané 23
4.7 Le décollage 24
4.8 L'atterrissage 24
5 STABILITE STATIQUE D'UN AERONEF 25
5.1 Stabilité statique longitudinale 25
5.2 Stabilité statique transversale 25

AERODYNAMIQUE ET MECANIQUE DU VOL

1 LES FORCES AERODYNAMIQUES

1.1 LES ACTIONS DE L'AIR EN ECOULEMENT

Lorsque l'air s'écoule autour d'un objet, ou qu'un objet se déplace dans l'air, des forces aérodynamiques se créent sur l'objet. Pour s'en rendre compte il suffit de réaliser les trois petites expériences décrites ci-dessous avec des demi-feuilles A4 :

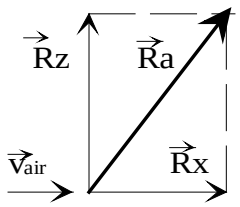
en soufflant sous la feuille	en soufflant sur la feuille	
		
Prenez la feuille en la pinçant à deux doigts par les deux extrémités d'une largeur et maintenez le bord à l'horizontal. La feuille plie sous son poids. Soufflez alors en dessous de la feuille.	Répétez la même expérience en soufflant sur le dessus de la feuille de façon à ce que l'air tangente sa surface.	Prenez deux demi-feuilles A4 en les tenant par un coin et séparez les de quelques centimètres. Ecartez leurs extrémités vers l'extérieur de sorte qu'elles ne se touchent pas. Soufflez entre les deux.
…….	……..	…….

La première expérience met en évidence la capacité de l'air à pousser un obstacle qu'il rencontre par …… sur une des faces de celui-ci.

La deuxième expérience met en évidence un effet d'aspiration. Lorsque l'air est mis en mouvement sur la surface supérieure de la feuille, il voit ……

(accélération de l'écoulement). La pression de l'autre face étant supérieure, la feuille est alors aspirée vers le haut.

La troisième expérience confirme l'analyse de la seconde : l'air soufflé entre les feuilles étant à une pression plus faible que celui à l'extérieur, les feuilles se rapprochent.



D'une manière générale en aérodynamique les actions de l'air se décomposeront en deux forces :

- une …… à la vitesse de l'air et de même sens, la …… $\vec{R}x$

- une …… à la vitesse, …….. $\vec{R}z$

La somme vectorielle de ces deux forces constitue la …… des forces aérodynamiques $\vec{R}a$

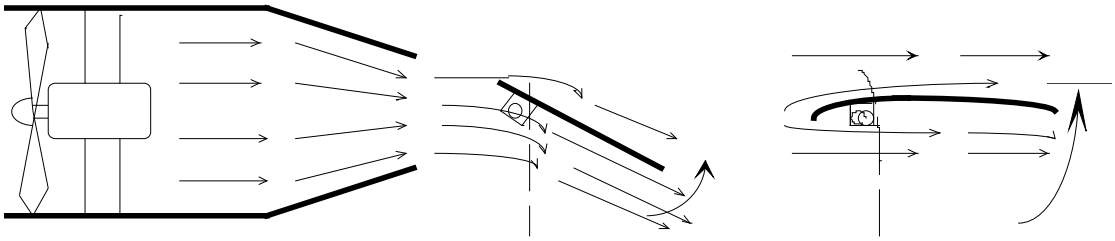
1.2 ETUDE DE LA PORTANCE

1.2.1 Influence de la forme du profil

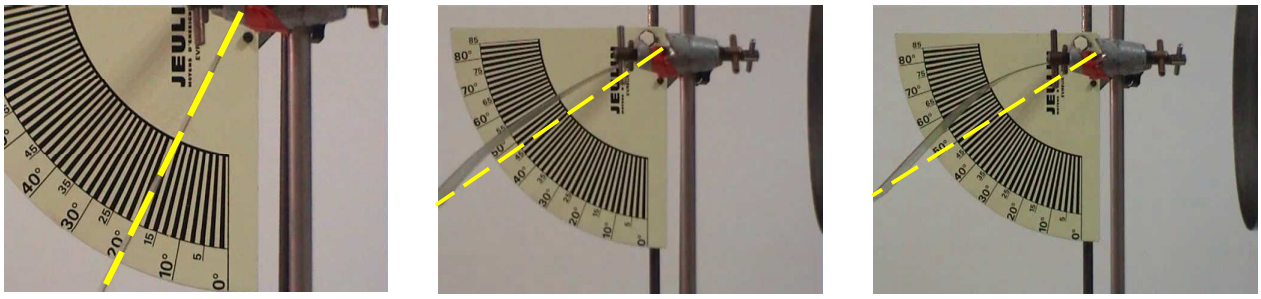
Réalisons une manipulation en soufflerie pour observer les effets de l'écoulement de l'air sur une plaque plane et sur deux plaques incurvées.

Les Trois plaques sont placées dans l'écoulement d'air produit par une soufflerie. Celle-ci est constituée d'un moteur électrique entraînant une hélice pour provoquer l'écoulement d'air. Derrière l'hélice on trouve un conduit cylindrique dans lequel l'écoulement se tranquillise un peu. L'air passe ensuite dans un cône convergent pour être accéléré avant d'aborder les profils.

Ceux-ci sont suspendus par un axe horizontal autour duquel ils peuvent pivoter librement. Initialement ils pendent verticalement sous l'effet de leur poids. Lorsque la soufflerie est en fonctionnement, leur position peut varier sous l'influence des forces aérodynamiques.



Les trois photos ci-dessous représentent les positions d'équilibre des trois profils dans la soufflerie :



Lorsque l'on met en marche la soufflerie à son régime maximum, on constate que la plaque plane ……..

Cette inclinaison résulte essentiellement de …… créée par le ralentissement de l'air sur le dessous de la plaque.

Si on place le premier profil incurvé dans la soufflerie, on constate que pour la même vitesse d'écoulement de l'air, ……..

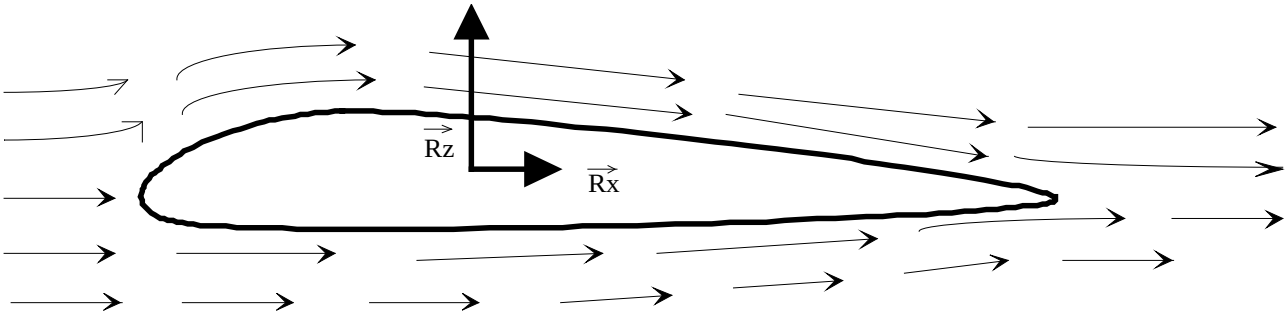
La forme de la plaque permet à l'air qui passe au-dessus …….. Sa pression diminue. Il en résulte …….. efficace du profil qui vient alors se positionner à l'horizontale.

Pour le deuxième profil incurvé dans la soufflerie, on constate que pour la même vitesse d'écoulement de l'air, ……..

La cambrure du profil est un peu plus prononcée et l'accélération de l'air sur l'extrados est encore plus importante.

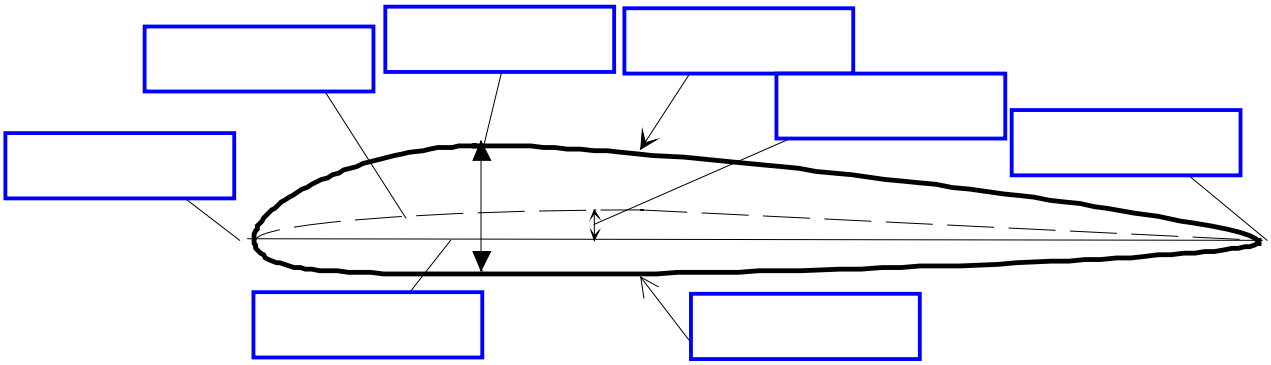
La forme du profil influe donc beaucoup sur la portance. En pratique, on a découvert qu'un profil possédant une certaine épaisseur est plus efficace qu'un simple plan incurvé. On a donc développé l'étude de différents profils pour déterminer les caractéristiques à leur donner en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire.

L'écoulement autour des profils aérodynamiques est plus accéléré sur la surface …… que sur la surface …….. Il en résulte une force de pression verticale orientée vers le …….. (la portance). De même la pression sur l'avant du profil est …… à celle sur l'arrière du profil. Il en résulte une force de pression vers …… (la traînée).



1.2.2 Les profils d'aile

Dans les années 1930 la N.A.C.A. (ancêtre de la National Air and Space Agency ou N.A.S.A.) a étudié de nombreux profils dont les caractéristiques ont été rendues publiques. Depuis d'autres sont venus s'ajouter pour fournir une bibliothèque très complète de profils bien connus. On associe un certain nombre de termes aux profils aérodynamiques :

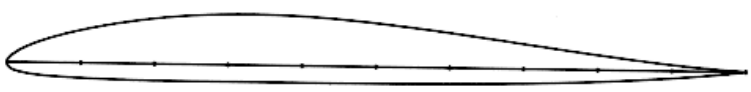


L'air aborde le profil par le **bord d'attaque** et le quitte par le **bord de fuite**. La partie supérieure du profil est appelée **extrados** et la partie inférieure **intrados**. Le segment qui joint le bord d'attaque et le bord de fuite est appelé **corde** du profil. La distance entre l'intrados et l'extrados est l'**épaisseur**. La valeur maximale de l'épaisseur divisée par la longueur de la corde donne **l'épaisseur relative :** .

La ligne qui joint le bord d'attaque au bord de fuite en passant à égale distance de l'intrados et de l'extrados est appelée **corde moyenne**. La distance maximale entre la corde et la corde moyenne est appelée **flèche** du profil. Le rapport entre la flèche et la longueur de la corde est appelé **courbure (ou cambrure) relative**.

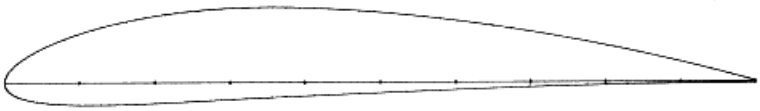
Le **centre de portance** (*point d'application de la portance*) se situe entre 30 et 50% de la corde depuis le bord d'attaque. Il avance quand l'incidence augmente jusqu'à l'incidence de décrochage puis recule. Le **foyer** (*point d'application des variations de portance*) se situe entre 20 et 30% de la corde depuis le bord d'attaque. Sa position varie peu.

Selon les applications envisagées, on peut utiliser différents types de profils :

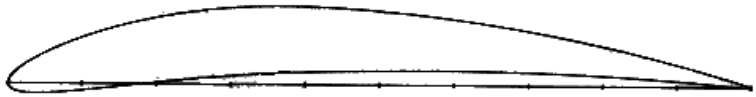


Le profil plan convexe porte bien même à faible incidence mais il est légèrement instable. Il est utilisé en aviation générale.

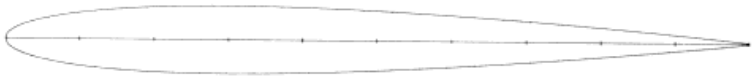
Profil B29



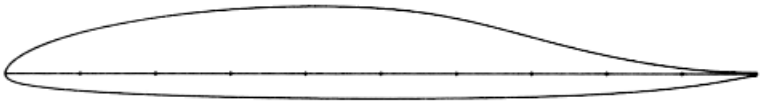
NACA 4412



EPPLER 471



NACA 0009



RONCZ

Le profil biconvexe dissymétrique porte également bien même à incidence nulle et est très stable. Très utilisé dans l'aviation de loisir.

Le profil cambré (ou creux) est très porteur mais il est assez instable. Lorsque l'incidence augmente, il cherche à cabrer.

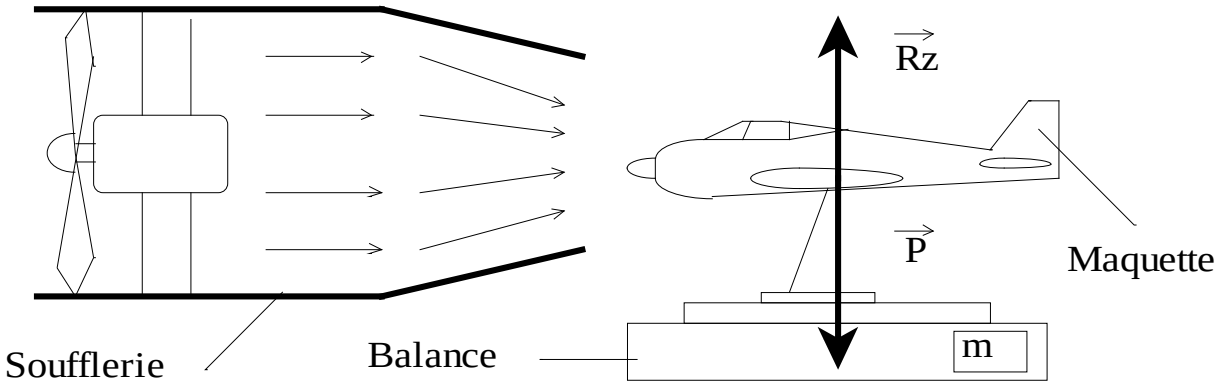
Le biconvexe symétrique ne porte pas aux faibles très faibles incidences. Il n'est intéressant que pour les gouvernes et la voltige.

Le profil à double courbure (ou auto stable) présente l'avantage d'une grande stabilité mais une portance moyenne et une traînée assez forte.

1.2.3 Influence de la vitesse

La portance d'un avion dépend de sa vitesse. Pour s'en rendre compte il suffit de penser au décollage. Afin d'obtenir une portance suffisante pour décoller, il faut que l'avion atteigne une vitesse minimale de sustentation.

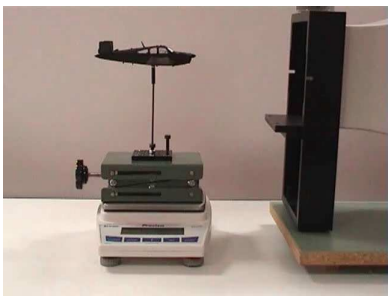
Il apparaît donc évident que la portance augmente avec la vitesse. Pour le vérifier expérimentalement, on peut placer une maquette en soufflerie et utiliser une balance pour mesurer la portance :



La maquette et son support sont placés dans la veine d'essai. Le support repose sur une balance sensible (à 0,1g) afin d'enregistrer les variations du poids apparent. Lorsque la soufflerie est à l'arrêt, la balance est soumise au poids de la maquette et la masse m indiquée correspond à celle de la maquette. En tarant la balance, la masse indiquée passe à 0g.

Quand on met en route la soufflerie, il se crée une portance sur les ailes de la maquette et la balance indique une masse négative. En fait la balance n'est plus soumise au poids P de la maquette, mais seulement à son poids apparent P-Rz. La masse indiquée par la balance traduit alors la norme de la portance : $m = \frac{-Rz}{g}$.

On peut alors calculer la portance obtenue : .



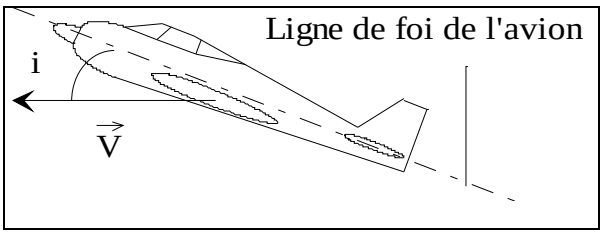
L'expérience montre que m diminue (valeur négative de plus en plus importante) lorsque la vitesse de l'écoulement augmente. On peut donc en déduire que

…….

Des mesures précises de la portance et de la vitesse de l'air montreraient que la portance est proportionnelle au carré de la vitesse de l'écoulement.

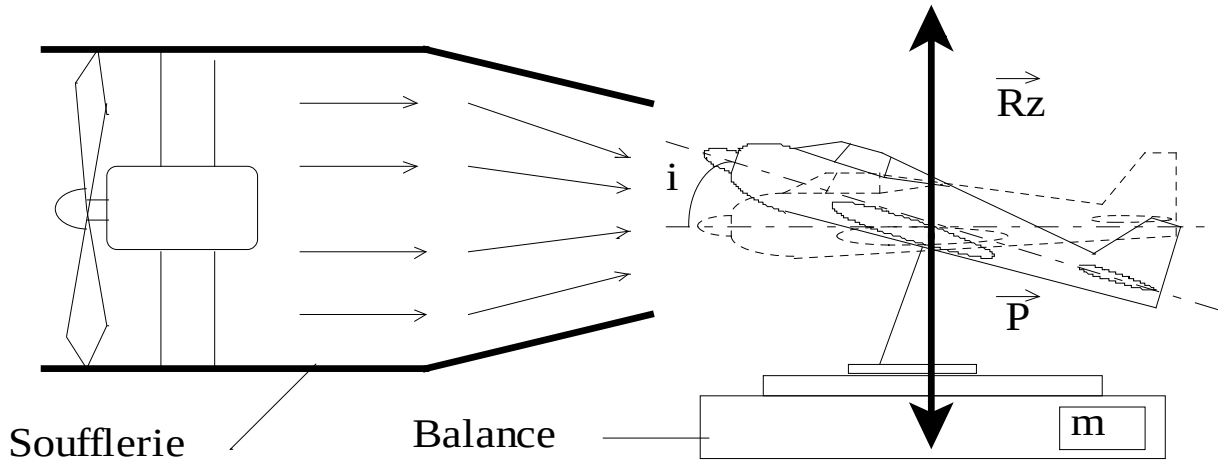
1.2.4 Influence de l'angle d'incidence

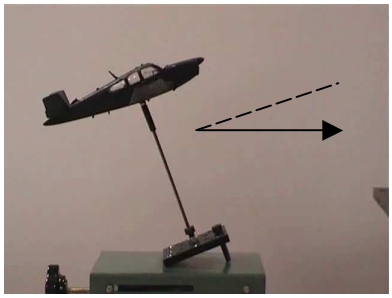
L'angle d'incidence est l'angle formé par …….. et celle de …….. . Cet angle est d'une grande importance car il influe beaucoup sur la portance des ailes de l'appareil.

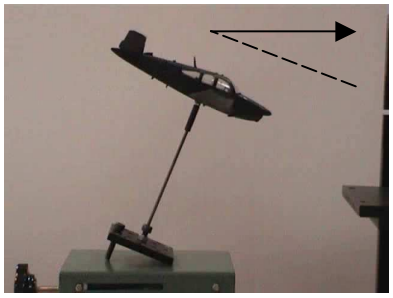


L'étude de l'évolution de la portance en fonction de l'incidence est primordiale dans la conception des avions. Pour voler en palier à une vitesse donnée la portance de l'avion doit compenser son poids. La vitesse étant fixée, l'incidence de vol se trouve également fixée.
Pour un vol économique et confortable, il faut que l'incidence soit faible pour la vitesse de croisière.

On peut réutiliser le dispositif précédent pour étudier l'influence de l'incidence sur la portance :

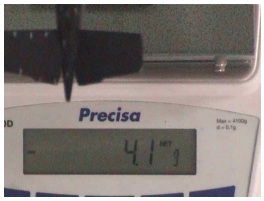






…….. …….. ……..

Les photos suivantes montrent l'affichage de la balance pour des incidences respectives de 0, +6, +12, +24 et –24° :



i = 0°

i = +6°

i = +12°

i = +24°

i = -10°

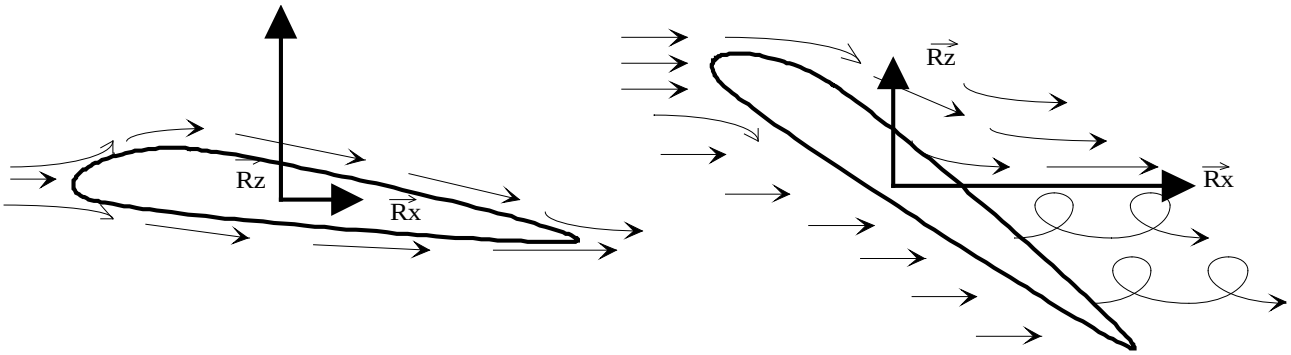
Les résultats montrent que pour une vitesse donnée,

…….

On constate qu'une incidence négative assez importante engendre une portance négative. Le signe de la masse mesurée par la balance a changé : la maquette appuie sur la balance avec une force supérieure à son simple poids.

Les faibles vitesses de la soufflerie et les faibles dimensions de la maquette ne donnent que des résultats qualitatifs et rendent difficile la mise en évidence du décrochage.

En effet on constate en réalité que si l'incidence dépasse une certaine valeur, ……. . C'est le ……. de l'aile :



Lorsque l'air est dévié par le profil, il "adhère" à la paroi grâce à sa viscosité. Elle lui permet donc de suivre les courbes de l'intrados et de l'extrados, engendrant ainsi la portance.

Si l'incidence devient trop importante, l'air ne parvient plus à suivre la courbure de l'extrados. Les filets d'air se décrochent de la paroi. L'écoulement derrière celle-ci est très turbulent et la pression remonte sur cette partie de l'extrados.

La portance diminue alors très fortement (et la traînée est importante), l'avion décroche. En conclusion, **à vitesse donnée la portance de l'aile augmente avec l'incidence, jusqu'à l'incidence de décrochage.**

Le décrochage se produit toujours à la même incidence.

Pour les pilotes d'avions performants, l'incidence est primordiale dans les phases de décollage et surtout d'atterrissage.

En effet les avions rapides sont calculés pour voler en croisière avec une incidence faible (2 à 3° maximum). Dans les phases de vol à vitesse lente, ils ont besoin, pour obtenir une portance suffisante, d'augmenter leur incidence (l'utilisation de dispositifs hypersustentateurs permet de limiter cette incidence mais ne suffit pas).

La traînée est alors importante et une augmentation soudaine de l'incidence peut entraîner un décrochage, il faut alors être très vigilant.

D'une manière générale, pour maintenir un vol en palier, si le pilote augmente la vitesse, il devra …… pour maintenir sa portance (il …… donc légèrement sur le manche). En revanche s'il diminue sa vitesse, il devra

…… pour maintenir sa portance (il …… donc légèrement sur le manche).

1.2.5 Expression de la portance

Des études très poussées en soufflerie ont permis de mettre en évidence l'expression de la portance :

avec :

- ρ la masse volumique de l'air. Quand la température augmente, ρ diminue. De ce fait l'air « porte moins » quand il fait chaud. La masse volumique de l'air diminue également avec l'altitude. La portance diminue donc avec l'altitude.
- S est une surface de référence sur l'aile. On l'appelle parfois maître couple. D'une manière générale si on augmente la surface de l'aile, on augmente sa portance.
- v est la vitesse de l'avion dans l'air (vitesse vraie). Si on multiplie par 2 la vitesse, on multiplie par 4 la portance.
- **Cz** est le **coefficient de portance** de l'aile. Il dépend de la forme du profil et de l'incidence de vol. Les profils présentant des courbures importantes ont des bons Cz. Le Cz augmente avec l'incidence jusqu'à l'incidence de décrochage. Dépassé cette incidence sa valeur chute.

La portance se crée sur chaque partie de l'aile. Pour simplifier sa représentation on la représente en un point en regroupant l'ensemble de des petits éléments de portance.

Le point d'application de la portance globale s'appelle le ……..

Lors des différentes phases de vol il se déplace sur l'aile en fonction de la vitesse et de l'incidence. Plus ses déplacements sont importants et plus l'avion sera délicat à piloter.

Les variations de la portance sont quant à elles appliquée en un autre point que l'on appelle …….. . **Il se situe entre le quart (25%) et le tiers (33%) de la corde en partant du bord d'attaque.** Ses déplacements sont limités.

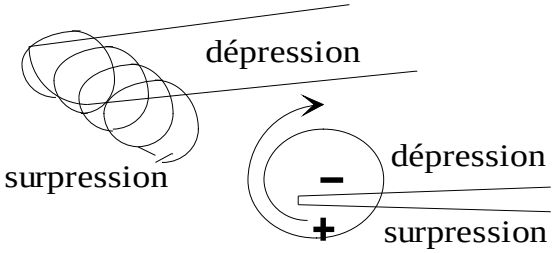
1.3 ETUDE DE LA TRAINEE

1.3.1 Les différentes traînées

La traînée d'un profil résulte des forces de pression dans l'axe de l'avion. Toutefois on peut la décomposer en trois parties distinctes :

- la traînée de ……..
- la traînée de ……..
- la traînée …….. (due à la portance).

La première est liée ……... Les différents profils engendrent des écoulements différents. Les différences de pressions entre l'avant et l'arrière ne sont donc pas identiques, la traînée est donc influencée par la forme du profil.



La seconde est liée ……. sur l'arrière du profil. Plus les filets se décollent et plus la traînée de sillage est importante. Elle est influencée par la vitesse et l'incidence de vol de l'avion.

La dernière est liée aux différences …… entre l'intrados et l'extrados de l'aile (qui engendrent la portance).

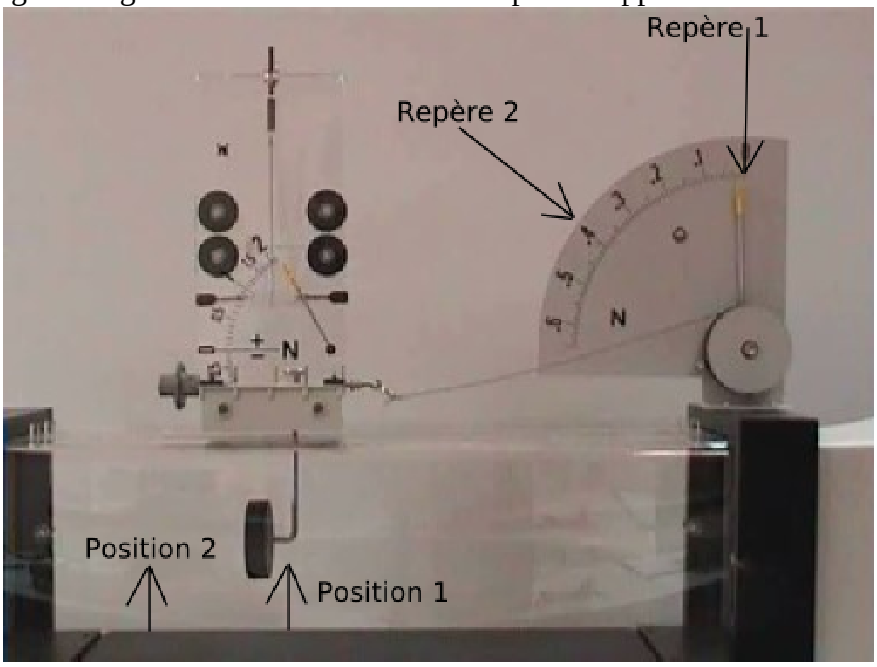
En effet l'air de l'intrados étant en …… par rapport à celui de l'extrados, l'air du dessous du profil a tendance …… vers le dessus au niveau des saumons d'aile. Cela crée des tourbillons que l'on appelle …… . En extrémité d'aile ils partent de l'intrados de l'aile et remontent vers l'extrados. Ils s'élargissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne derrière l'aile.

L'avion laisse donc derrière lui deux tourbillons qui engendrent des perturbations d'autant plus importantes que l'avion est de grande taille. Ceux-ci peuvent s'avérer très dangereux lorsqu'on passe dans le sillage d'un autre appareil, notamment en phase de décollage ou d'atterrissage. C'est la raison pour laquelle lorsque deux avions se suivent dans les phases de décollage ou d'approche sur un aéroport, ils doivent s'espacer en fonction de leurs poids respectifs (car le poids est représentatif de la taille de l'avion et donc de la puissance des tourbillons marginaux qu'il engendre).

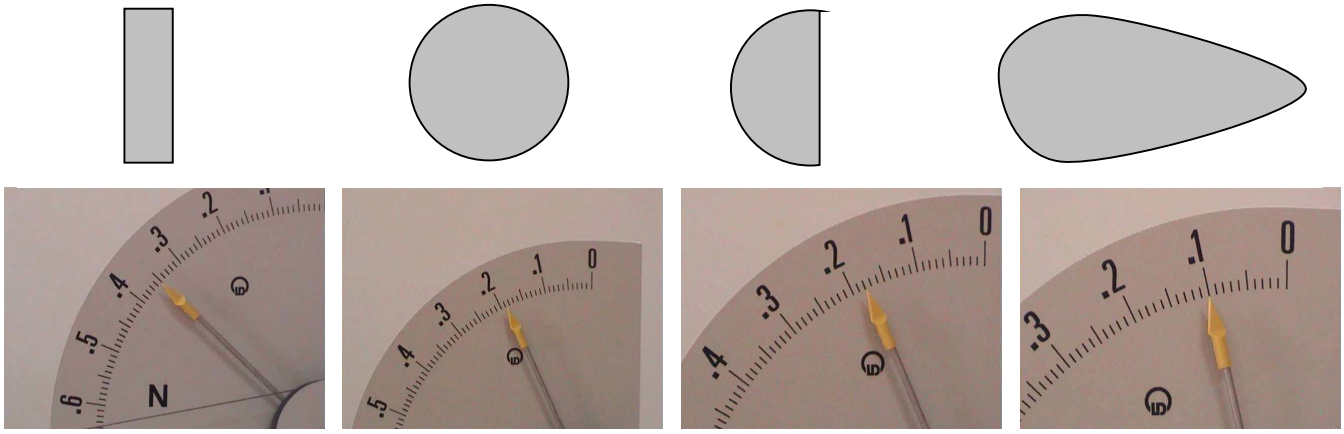
1.3.2 Influence de la forme

Pour étudier l'influence de la forme du profil sur la traînée, on place différents profils dans la veine de la soufflerie. Ces mobiles sont reliés à une balance mécanique à ressort permettant de mesurer la traînée exercée.

Lorsque la soufflerie est arrêtée, le mobile est en équilibre (position 1) et le repère de la balance est à la verticale (repère 1). On fixe ensuite la vitesse de l'écoulement et on constate que le mobile est entraîné vers l'arrière sous l'effet de la traînée (position 2). Le repère de lecture de la traînée passe alors du repère 1 au repère 2. Il suffit de lire la graduation pour connaître la traînée du profil. L'échelle est graduée grâce à la connaissance du couple de rappel du ressort.



En plaçant les différents profils dans la soufflerie produisant un écoulement à une vitesse fixée, la mesure des différentes traînées obtenues permet de montrer que le disque traîne plus que la demi-sphère qui traîne plus que la goutte.



Ceci explique que l'on a cherché pendant assez longtemps à s'approcher de cette forme pour les aéronefs. Aux très grandes vitesses le problème se complique et la goutte n'est plus la forme la plus intéressante.

En conclusion, ……...

1.3.3 Influence de la vitesse

Le même dispositif permet, pour un profil donné, d'étudier l'influence de la vitesse sur la traînée. Les mesures montrent que

…….

Des mesures précises mettraient en évidence que la traînée est proportionnelle au carré de la vitesse.

1.3.4 Influence de l'incidence

Il est possible d'étudier l'influence de l'incidence sur la traînée en utilisant le même dispositif à condition de pouvoir régler une incidence fixe pour le profil dans la veine d'air. L'incidence est fixée initialement entre la corde du profil et l'axe de la soufflerie (qui représente la direction de la vitesse). La mesure s'effectue ensuite selon le même protocole.

On met ainsi en évidence que la …….

Contrairement à la portance, elle augmente sans cesse avec l'incidence.

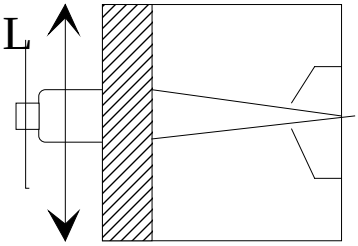
Il en résulte que dans les phases à grande incidence, la traînée importante peut nécessiter de maintenir une puissance importante au moteur. D'autre part en cas de nécessiter d'accélérer (remise de gaz à l'atterrissage) il est important de prévoir une phase initiale d'accélération assez lente.

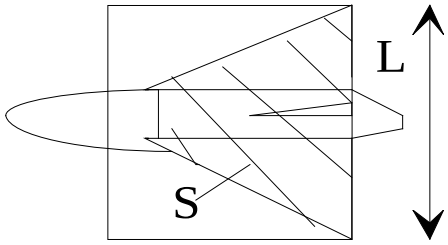
Ceci n'est réellement sensible que sur les avions rapides ou sur les avions lourdement chargés (incidence assez importante en approche).

Il est parfois préférable de pousser le manche en avant afin de diminuer rapidement l'incidence pour accélérer plus vite et obtenir plus rapidement une portance permettant de remonter.

1.3.5 Influence de l'allongement

L'allongement d'un avion est le rapport entre le carré de son envergure (L) et sa surface alaire (S = surface des ailes) : [ ]. Voici quelques exemples :





L'expérience montre que plus l'allongement de l'aile est ……., moins la traînée est importante.

En fait l'allongement influence la traînée induite dans des proportions importantes. La recherche d'une traînée minimale et d'une portance optimale passe parfois par des ailes de grand allongement.

C'est le cas pour …… et pour ……..

Toutefois les ailes de grand allongement entraînent une plus grande inertie de l'avion au gauchissement et donc une agilité moins bonne.

La présence de winglets permet de diminuer la traînée induite de façon significative.

1.3.6 Expression de la traînée

Des études très poussées en soufflerie ont également permis de mettre en évidence l'expression de la traînée :

[ ]

Avec :

- ρ la masse volumique de l'air. Quand la température augmente, elle diminue. De ce fait l'avion traîne moins quand il fait chaud. La masse volumique de l'air diminue également avec l'altitude. La traînée diminue donc avec l'altitude.
- S est la surface de référence sur l'aile. On utilise la même que pour la portance. D'une manière générale si on augmente la surface de l'aile, on augmente sa traînée.
- v est la vitesse de l'avion dans l'air (vitesse vraie). Si on multiplie par 2 la vitesse, on multiplie par 4 la traînée.
- **Cx** est le **coefficient de traînée** de l'aile. Il dépend de la forme du profil et de l'incidence de vol. Les profils minces présentent de meilleurs Cx que les profils épais. Le Cx augmente continuellement avec l'incidence même après l'incidence de décrochage. Au-delà de cette incidence, la traînée continue à augmenter alors que la portance chute.

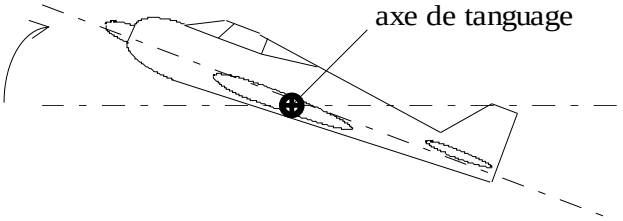
La traînée est représentée au centre de poussée comme la portance.

2 UTILISATION DES FORCES AERODYNAMIQUES POUR LE CONTROLE DE LA TRAJECTOIRE

Afin de diriger l'avion dans l'espace, on utilise des efforts aérodynamiques (portances et traînées) créés sur de petites surfaces que l'on appelle …….. afin de provoquer des rotations sur les trois axes de l'avion (roulis, tangage et lacet).

2.1 LE CONTROLE DU TANGAGE

Pour faire monter l'avion, il faut lui basculer le nez vers le ciel et pour le faire descendre, il faut lui basculer le nez vers le sol.



Autrement dit, il faut provoquer une rotation autour de l'axe de ……. C'est à dire celui qui joint les extrémités des deux ailes.

En pratique, on joue sur …… de l'empennage horizontal.

Si on augmente sa portance, la queue de l'avion va …… et le nez va basculer vers le sol : l'avion ……..(figure 2).

Si on diminue sa portance, la queue va …… et le nez de l'avion va basculer vers le ciel : l'avion …… (figure 3).

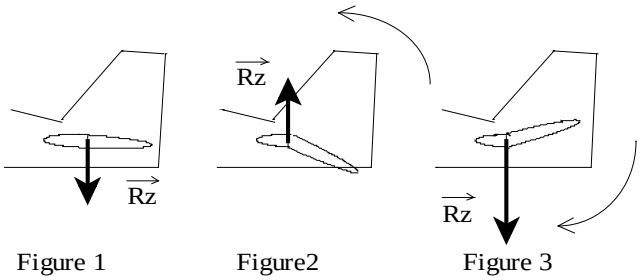


Figure 1 Figure2 Figure 3

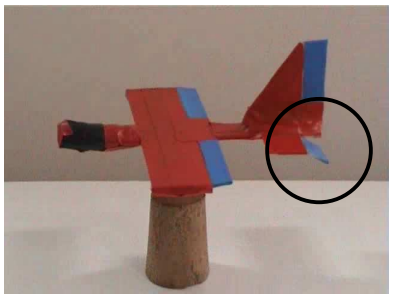
Il est à noter qu'initialement pour un vol en palier équilibré, l'empennage horizontal de l'avion est …… (c'est à dire que sa portance est orientée vers le bas).

Les modifications de la portance de l'empennage horizontal sont obtenues en braquant la **gouverne de profondeur ou** ……. Celle-ci permet de modifier …… et …… de l'empennage horizontal.

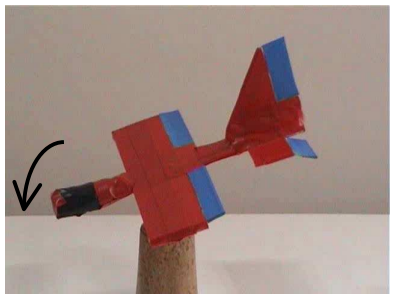
On peut choisir de basculer entièrement l'empennage horizontal (empennage monobloc). Les variations de portance sont alors obtenues simplement par la variation de l'incidence de la gouverne.

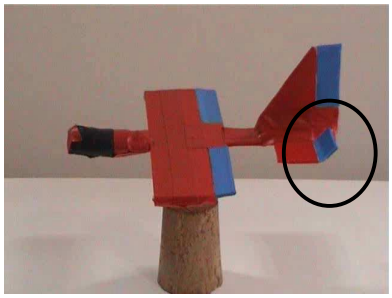
Les mouvements de la profondeur sont ……sur la partie droite et la partie gauche de l'empennage horizontal.

Pour vérifier l'efficacité de ce dispositif, il suffit de placer dans la soufflerie une maquette dont la profondeur est orientable.



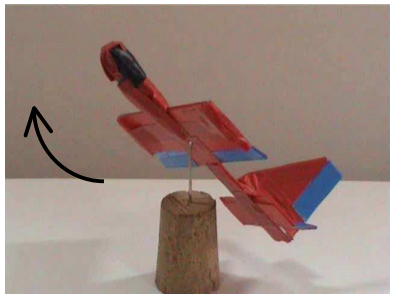
On vérifie bien qu'un braquage de la gouverne de profondeur vers le bas (manche à piquer) ……

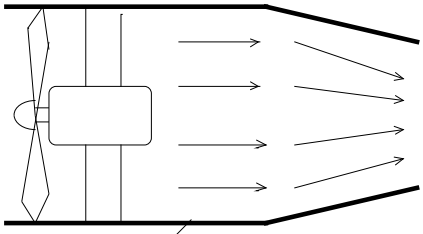




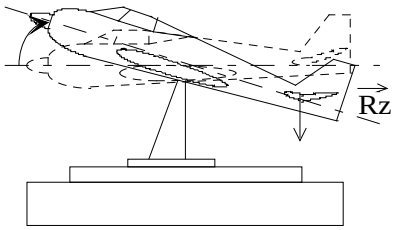
De même qu'un braquage de la gouverne vers le haut (manche à cabrer)

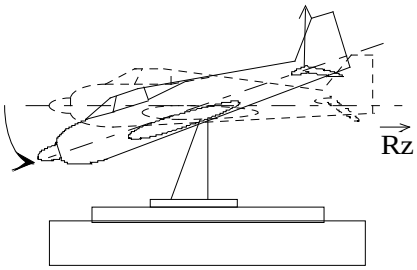
……





Soufflerie



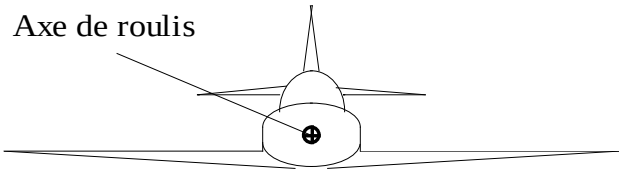


La commande de profondeur n'a pas d'effets secondaires sur la trajectoire. Toutefois, si on tire sur le manche, la montée que l'on amorce engendre

……. De même si on pousse sur le manche, il faut réduire les gaz pour éviter que la vitesse n'augmente.

2.2 LE CONTROLE DU ROULIS

Pour faire basculer l'avion sur l'aile gauche ou sur l'aile droite, il faut jouer sur ……. de chaque aile. Autrement dit, pour provoquer une rotation autour de l'axe de roulis, c'est à dire celui qui joint le nez de l'avion à la queue, il faut ……. la portance d'une aile et ……. celle de l'autre.

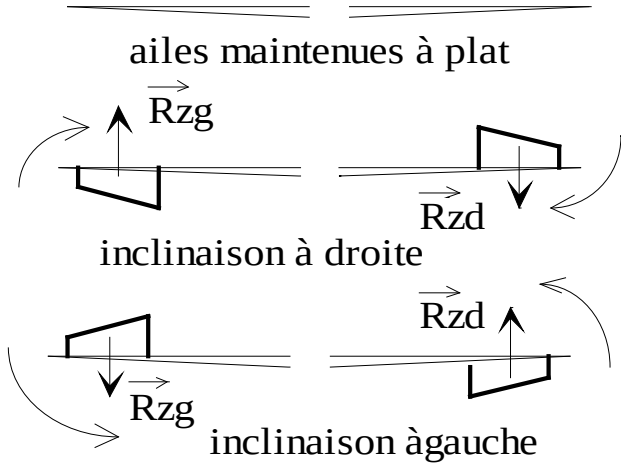


Pour s'incliner à droite, il faut ……. la portance de l'aile droite et ……. celle de l'aile gauche. Pour s'incliner à gauche, il faut faire le contraire.

Pour modifier la portance des ailes on utilise des ……. .

Ces gouvernes situées en bout d'aile (pour augmenter leur …….) et permettent d'obtenir un effet opposé sur les deux ailes par un braquage ……. .

On ……. l'aileron du côté où il faut ……. la portance et on le lève du côté où il faut la diminuer.



Baisser un aileron rend le profil …….. en bout d'aile et augmente également …….. . Il en résulte une augmentation de la portance du bout de l'aile. Le braquage opposé sur l'autre aile produit l'effet inverse.

En résumé pour incliner l'avion à droite, il faut monter l'aileron droit et baisser l'aileron gauche (en mettant le manche à droite); pour incliner l'avion à gauche il faut monter l'aileron gauche et baisser l'aileron droit (en mettant le manche à gauche).

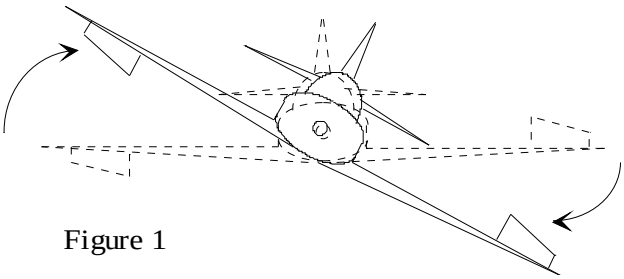


Figure 1

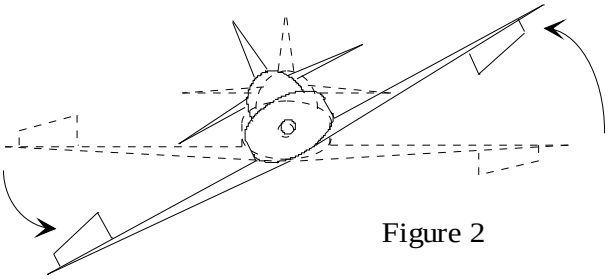
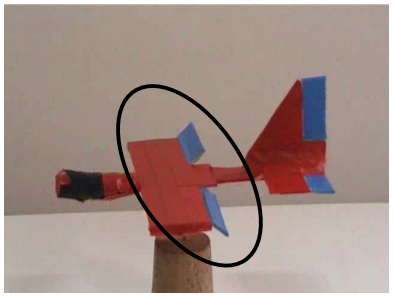


Figure 2

Dans le langage des pilotes, plutôt que dire que l'on incline l'avion à droite ou à gauche, **on dit que l'on gauchit à droite ou à gauche**. Ce terme vient de l'époque où la rotation autour de l'axe de roulis s'obtenait en déformant les ailes entières et il est resté.

La commande en roulis se dénomme par le terme de « …….. ».

Pour vérifier l'efficacité de ce dispositif, il suffit de placer dans la soufflerie une maquette dont les ailerons sont mobiles.

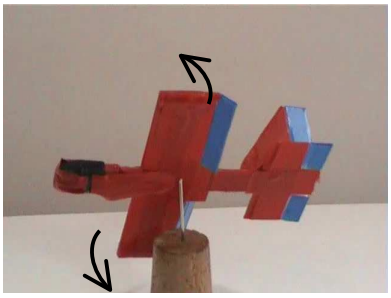


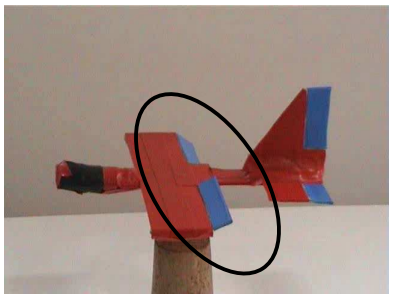
Aileron gauche ……

Aileron droit ……

1

…….



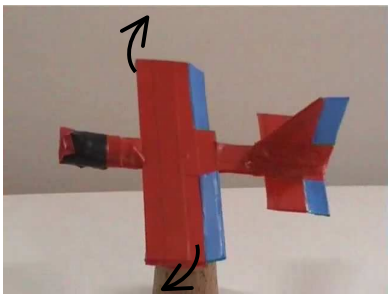


Aileron gauche ……

Aileron droit ……

1

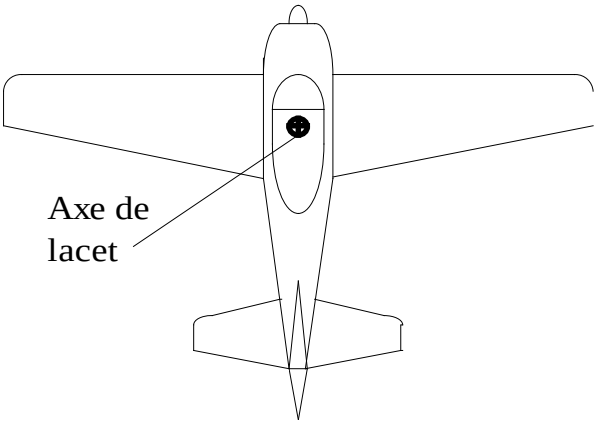
…….



Le gauchissement entraîne un **effet secondaire** sur la trajectoire : en effet, lorsqu'on incline l'avion, l'aile voyant sa portance augmenter, voit également …….. augmenter. Il se produit alors une rotation autour de l'axe de lacet. Le nez part du côté de …….. . Une inclinaison sur la droite engendre donc du lacet à gauche. **On parle de …….**.

2.3 LE CONTROLE DU LACET

Pour faire basculer le nez de l'avion à gauche ou à droite, il faut provoquer une rotation autour de l'axe **de lacet**, c'est à dire l'axe ……. au plan des ailes et passant par le centre de gravité de l'avion. C'est ……. qui permet de créer cette rotation.

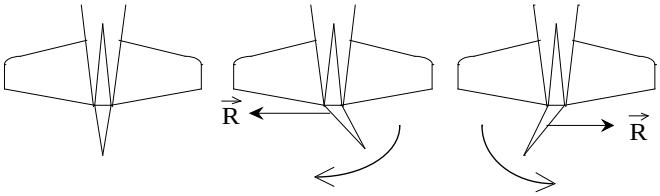


Une surface mobile verticale, la ……. , permet de créer un effort aérodynamique qui engendre une rotation de la queue vers la droite ou vers ……. .

En position de repos la gouverne de direction est dans l'axe de l'avion. La dérive crée une ……. dans l'axe de l'avion.

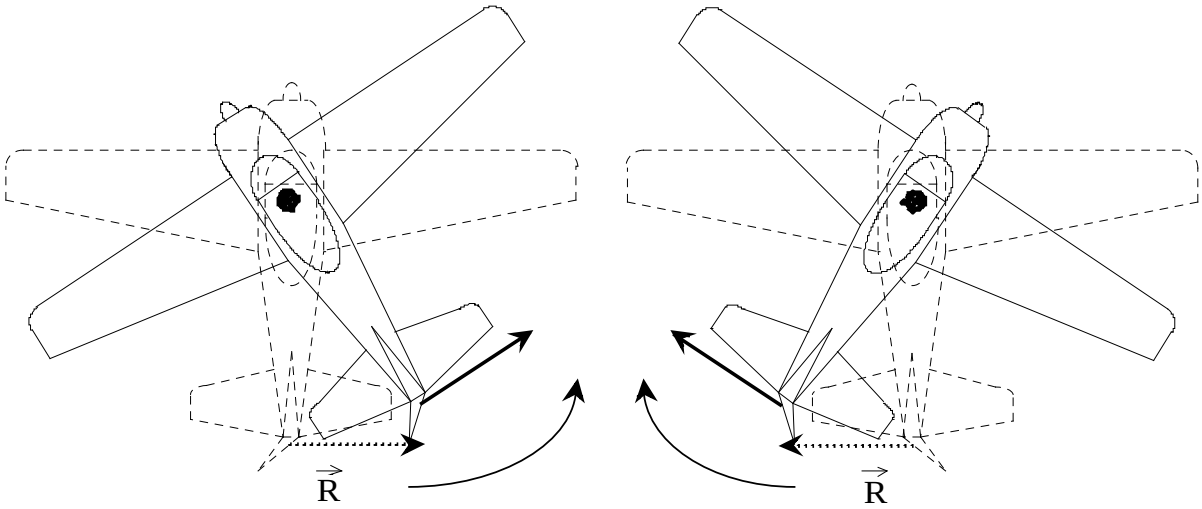
Lorsqu'on braque la gouverne à droite (en enfonçant le palonnier à droite), on engendre une résultante aérodynamique vers ……. sur l'empennage vertical. Celui-ci est donc entraîné ……. et le nez de l'avion part …….

Figure 1 Figure 2 Figure 3



Si on braque la gouverne vers la gauche, en enfonçant le palonnier à gauche, on engendre une résultante aérodynamique sur l'empennage vertical dirigée vers la droite. La queue part donc à droite et le nez à gauche.

En pratique, pour amener le nez vers la droite ou vers la gauche, il faut enfoncer le pied du côté ou on veut amener le nez.



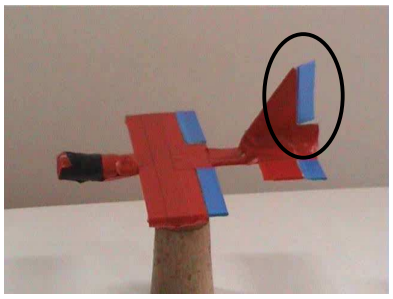
En réalité, l'empennage horizontal n'est pas toujours dans l'axe de l'avion; il peut être légèrement décalé, notamment sur les monomoteurs à hélice.

En effet le souffle hélicoïdal de l'hélice entraîne un écoulement dissymétrique sur l'empennage et la rotation de l'hélice engendre un couple gyroscopique. L'avion a donc tendance à partir en lacet.

Pour rendre son pilotage plus confortable, on donne initialement un angle de calage à l'empennage vertical de telle sorte qu'en palier à la vitesse de croisière le pilote n'ait pas besoin de toucher au palonnier.

En revanche dans les phases de décollage et d'atterrissage il doit utiliser des braquages de direction pour maintenir un vol symétrique et contrer la tendance naturelle de l'avion au lacet.

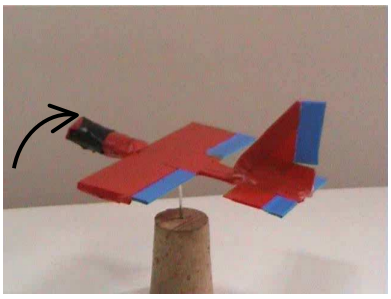
Pour vérifier l'efficacité de la direction, il suffit de placer dans la soufflerie une maquette dont la gouverne de direction est orientable.

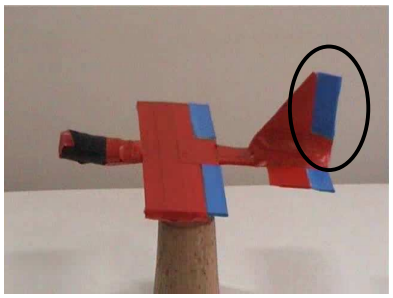


Gouverne de direction braquée ……..

1

……..





Gouverne de direction braquée ……..

1

……..

Lorsque la direction est enfoncée d'un côté, l'avion se met en rotation autour de l'axe de lacet de ce côté. Il a alors une aile qui avance plus vite que l'autre dans l'écoulement d'air.

Cette aile voit donc sa portance …….. par rapport à l'autre et cela engendre du …….. .

Par exemple si on enfonce la direction à gauche, le nez défile par la gauche et l'aile droite accélère par rapport à l'aile gauche. Sa portance augmente et elle se soulève. L'avion se met en roulis par la gauche.

Un mouvement de lacet dans un sens entraîne donc du roulis dans le même sens. **On parle de** …….. .

3 ETUDE DES POLAIRES

3.1 GENERALITES SUR LES POLAIRES

Afin de pouvoir déterminer aisément les caractéristiques d'un profil et choisir sans surprise le plus adapté entre plusieurs modèles, ou afin de déterminer les dimensions que l'on donnera à une aile une fois le profil choisi, on utilise une courbe appelée …….. .

En pratique on en utilise de deux types :

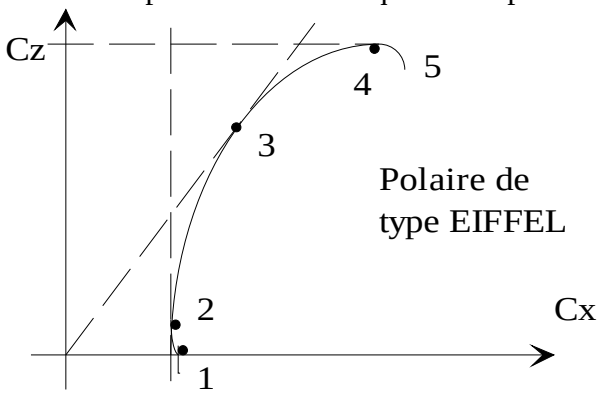
- la polaire type EIFFEL (que l'on doit à Gustave EIFFEL) : elle représente Cz en fonction de Cx (en pratique, on trace plutôt 100*Cz en fonction de 100*Cx en raison des faibles valeurs des coefficients aérodynamiques.
- la polaire des vitesses : elle représente Vz (vitesse verticale) en fonction de Vx (vitesse horizontale) dans le cas d'un vol plané. Elle est surtout utile pour la conception des ailes de planeurs ou parapentes.

3.2 ETUDE DE LA POLAIRE DE TYPE EIFFEL

L'allure de ce type de polaire est celle donnée ci-dessous. Elle évolue selon la forme du profil mais conserve toujours une allure globale similaire. Grâce à elle on détermine quelques caractéristiques essentielles du profil.

Elle s'obtient à l'aide de mesures effectuées en soufflerie : on place le profil dans une veine d'air de vitesse d'écoulement donné et pour différentes valeurs de l'incidence on mesure la portance et la traînée du profil. On en déduit alors Cz et Cx. En général on indique sur les points de la polaire l'incidence à laquelle ils correspondent.

Les points caractéristiques de la polaire sont les suivants :



1 : le point de ……. (à faible incidence)

2 : le point de ……. (traînée minimale du profil ; incidence faible)

3 : le point de ……. (incidence assez faible)

4 : le point de ……. (portance maximale; incidence proche du décrochage; traînée importante)

5 : zone de ……. du profil; Cz chute

Le point de finesse max est important : il représente l'incidence de vol permettant d'effectuer la distance la plus longue possible en vol plané sans vent. La finesse peut se définir de plusieurs façons :

C'est à la fois le rapport :

- du coefficient de portance Cz sur le coefficient de traînée Cx
- de la portance Rz sur la traînée Rx
- de la vitesse horizontale Vx sur la vitesse verticale Vz
- de la distance parcourue D sur l'altitude perdue Δz.

Ce point se repère sur la polaire en prenant la tangente à la courbe passant par l'origine du repère.

Les planeurs de compétition modernes ont des finesses maximales de 60 à 70, celles des planeurs de club se situent entre 25 et 35, celles des avions de ligne et des avions d'aéroclub autour de 10 et celles des parapentes autour de 6 et celles des avions de chasse autour de 5.

De nos jours les progrès de la simulation numérique permettent de simuler les écoulements autour d'un profil et d'en déduire sa polaire. Ces techniques présentent encore des limites mais elles

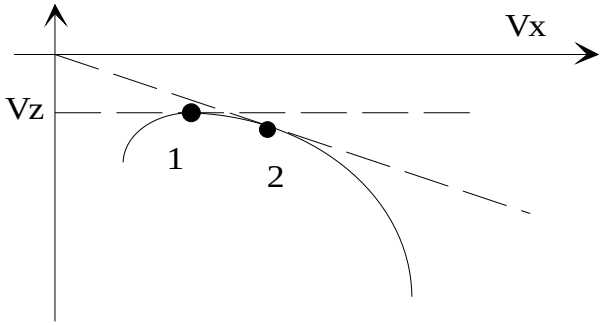
évoluent rapidement. On peut déjà étudier de nouveaux profils sans effectuer le moindre essai en soufflerie.

3.3 ETUDE DE LA POLAIRE DES VITESSES

La polaire des vitesses est d'une utilisation moins courante que la polaire d'EIFFEL. En effet elle représente la vitesse verticale en fonction de la vitesse horizontale pour un vol en plané rectiligne.

Elle permet de déterminer des qualités et défauts du profil mais ne s'avère plus intéressante que la polaire d'EIFFEL que pour l'étude des vols planés.

Les points les plus importants sont :



- le …… (1)

qui représente la vitesse verticale minimale que l'on peut prendre pour planer. C'est à cette vitesse que la descente sera la plus longue **en durée**. Pour une vitesse inférieure, on décroche.

- la …… (2)

qui représente la vitesse pour laquelle la distance parcourue avant d'arriver au sol sera la plus grande. C'est à ce régime de vol que se placent les vélivoles et les parapentistes dans les ascendances.

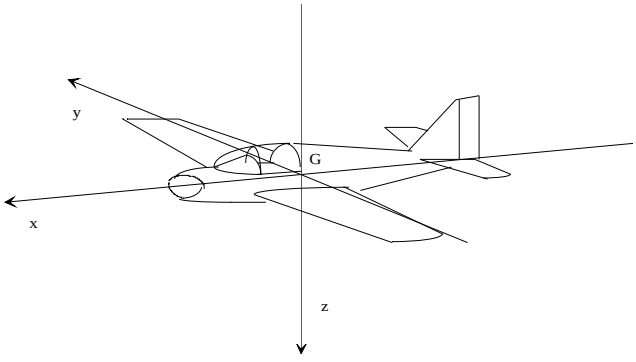
Cela leur permet alors de profiter de la vitesse verticale de la masse d'air pour gagner un maximum d'altitude par rapport au sol.

4 LES PRINCIPALES PHASES DU VOL

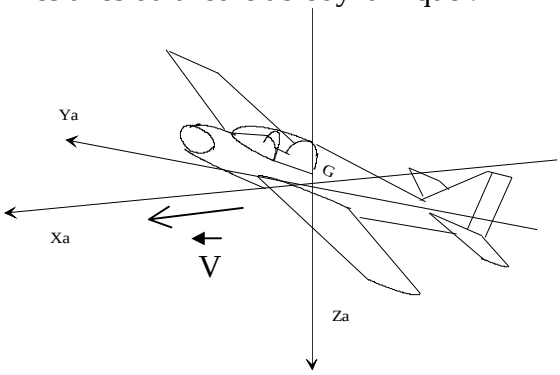
4.1 LES AXES ET LES ANGLES DE LA MECANIQUE DU VOL

En mécanique du vol on peut utiliser deux trièdres de référence :

- Les axes du trièdre avion :

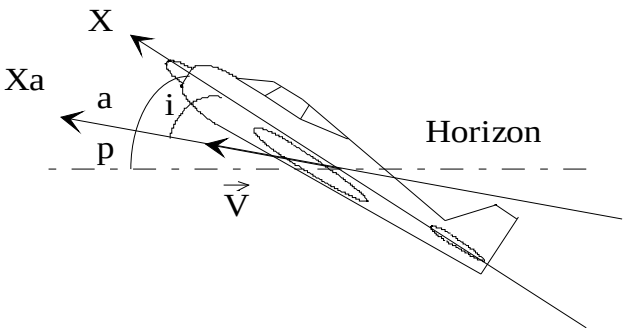


- Les axes du trièdre aérodynamique :



Pour repérer le déplacement de l'avion dans l'espace, il faut utiliser des angles positionnant l'avion par rapport aux axes des trièdres de référence :

- l'assiette, l'incidence et la pente :

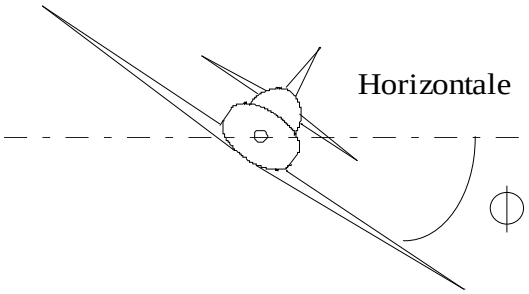


L'assiette est l'angle entre ……. et ……. . Elle est comptée positivement si le nez de l'avion est ……. de l'horizon et négativement s'il est en dessous. C'est l'angle indiqué par l'horizon artificiel.

L'incidence est l'angle entre ……. et ……. . Elle est comptée positivement si la ligne de foi est ……. de la direction de la vitesse.

La pente est l'angle formé entre ……. et ……. . Elle matérialise la trajectoire de l'avion. La pente est positive si la vitesse est ……. de l'horizontale.

- l'inclinaison :

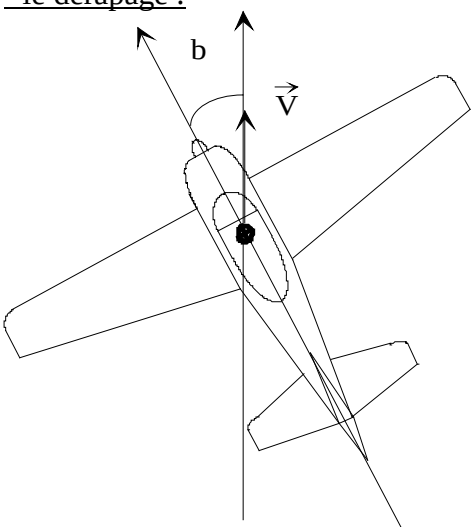


L'inclinaison est l'angle formé entre ……. et ……. .

Il est repéré dans l'avion à l'aide de l'horizon artificiel ou de l'indicateur de virage.
En vol à vue, on le repère par l'inclinaison du capot moteur sur l'horizon.

L'inclinaison a pour but principal de permettre d'effectuer des virages plus ou moins serrés.

- le dérapage :



Le dérapage est l'angle entre ……. et ……. .

Il est compté positivement par la droite (nez à ……de la vitesse).

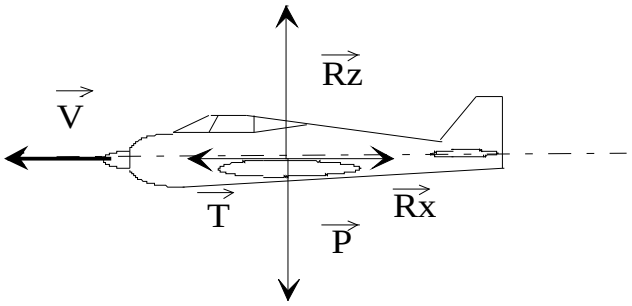
Il est indiqué à bord de l'avion par ……. Si elle est au centre, le dérapage ……, si elle est à droite, le dérapage est ……. (la bille indique le sens de la vitesse vraie).

L'angle de dérapage est important car s'il n'est pas nul en croisière l'avion consomme plus de carburant que nécessaire pour effectuer son vol.

En phase d'approche il est encore plus important car il augmente la vitesse de décrochage. En cas d'approche dérapée involontaire, une tenue rigoureuse de la vitesse habituelle d'approche peut entraîner un décrochage intempestif de l'appareil. Il est donc très important de surveiller ce

dérapage. On n'en crée un volontairement que pour certaines figures de voltige ou des rattrapages de plan.

4.2 LE VOL RECTILIGNE UNIFORME EN PALIER



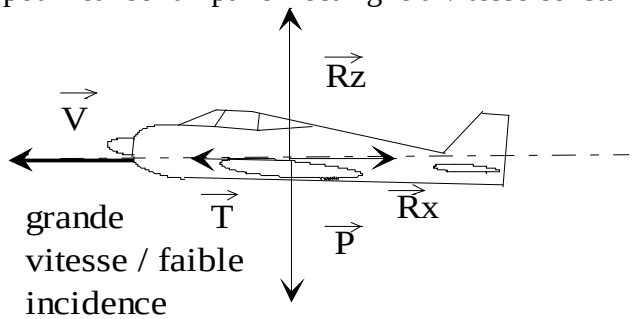
Le vol rectiligne en palier à vitesse constante reste la configuration de vol la plus fréquente.

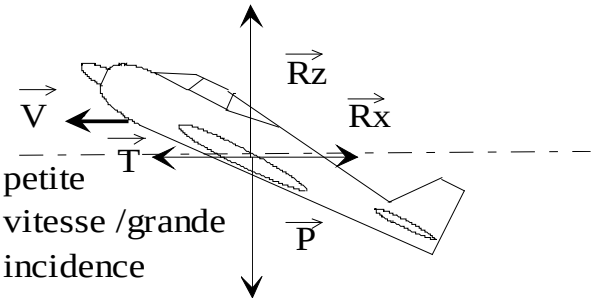
Pour maintenir l'équilibre de l'avion il faut que :

- ……..
- ……..

- la portance équilibre le poids : $Rz = m.g = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.Cz$
- la traction équilibre la traînée : $T = Rx = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.Cx$

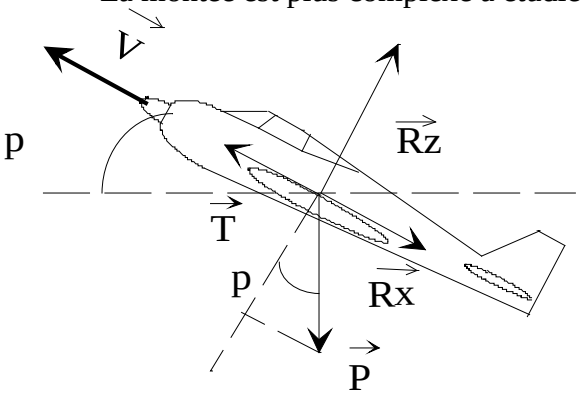
Pour une puissance moteur donnée il existe, en général, deux couples incidence - vitesse pour réaliser un palier rectiligne à vitesse constante :





4.3 LA MONTEE RECTILIGNE UNIFORME

La montée est plus complexe à étudier.



Du point de vue de la sustentation les choses restent assez simples.

La portance doit compenser la

…….. sur sa direction :

$$Rz = m.g.\cos(p) = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.Cz$$

La portance est inférieure au poids et le facteur de charge inférieur à 1.

Pour la propulsion, la traction doit compenser, …….. et ……dans sa direction :

$$T = Rx + m.g.\sin(p) = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.Cx + m.g.\sin(p)$$

En pratique la vitesse ne peut être maintenue indéfiniment.

Il existe plusieurs types de montée à vitesse stabilisée utilisés en pratique selon les priorités (gain d'altitude, temps de montée, rapport distance parcourue et altitude gagnée) :

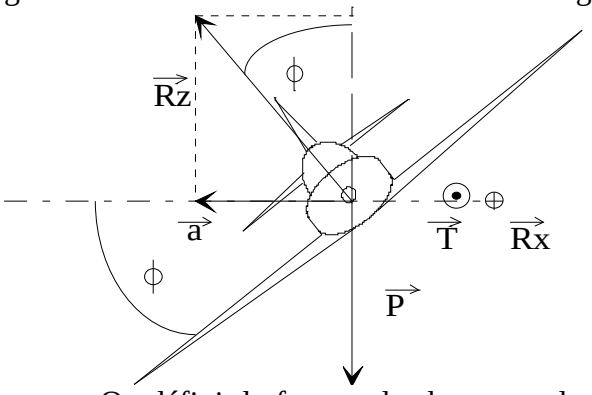
- la montée à pente max (pour gagner beaucoup d'altitude sur une faible distance) pour les franchissements d'obstacles.
- la montée à Vz max (pour gagner le plus rapidement possible de l'altitude) pour des gains d'altitude rapides.
- la montée à vitesse optimale (VOM) pour obtenir le meilleur rapport altitude gagnée, distance parcourue, temps écoulé et consommation. C'est la plus employée quand aucun impératif de sécurité ne se présente.

4.4 LA DESCENTE RECTILIGNE UNIFORME

Le principe de son étude est le même, cette fois le poids de l'avion devient moteur et on peut se permettre de diminuer la traction pour maintenir la vitesse. L'étude du vol plané est développée au 6, dans le cas d'un vol motorisé, il suffit de rajouter la traction.

4.5 LE VIRAGE SYMETRIQUE EN PALIER A VITESSE CONSTANTE

C'est également une configuration courante puisqu'en navigation les virages se font en général à altitude constante. Dans cette configuration l'équilibre des forces amène à écrire :



- ……. :

$$T = Rx = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.Cx$$

- la composante verticale de ……. compense ……. :

$$Rz.\cos\phi = m.g = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.Cz.\cos\phi$$

On définit le facteur de charge par le rapport des forces d'inertie et du poids, ce qui dans le cas d'un virage en palier à vitesse constante donne : .

On peut alors déterminer que le facteur de charge d'un virage à 30° d'inclinaison est d'environ 1,15g (1,4g pour 45° et 2g pour 60°).

D'autre part l'accélération de l'avion est $a = \frac{v^2}{R}$. En projetant sur le rayon du virage la relation fondamentale de la dynamique on obtient $Rz.\sin\phi = m\frac{v^2}{R}$ soit en la divisant par la deuxième équation $\tan\phi = \frac{V^2}{R.g}$. Cela signifie que pour une inclinaison donnée, le rayon de virage est déterminé par la vitesse.

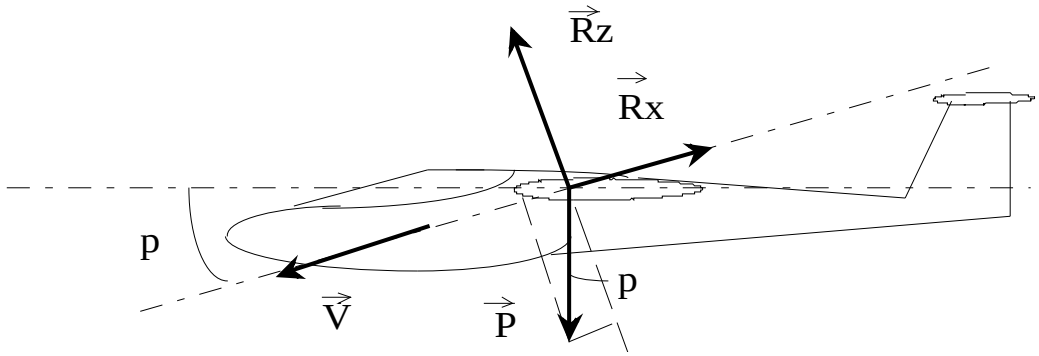
En virage la vitesse de décrochage est multipliée par $\sqrt{n}$.

Si le nez de l'avion est à l'intérieur de la trajectoire, le virage est qualifié de …….

Si le nez de l'avion est à l'extérieur de la trajectoire, le virage est qualifié de …….

4.6 LE VOL PLANE

Ce type de vol correspond au régime des planeurs et des parapentes. Etudions le cas d'une descente planée à vitesse constante :



En vol plané rectiligne stabilisé, l'équilibre des forces impose que :

- pour la sustentation : la portance compense ……
- pour la « propulsion » : la traînée compense ……

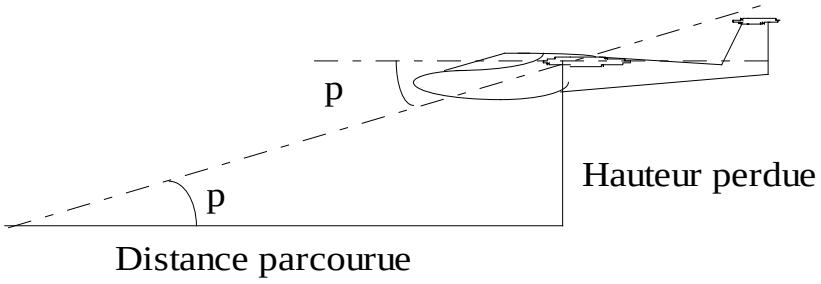
L'équilibre du vol donne les deux équations suivantes :

- en projetant les forces sur la direction de Rz : $Rz = m.g.\cos(p) = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.Cz$

- en projetant sur la direction de Rx : $Rx = m.g.\sin(p) = \frac{1}{2}.\rho.S.v^2.Cx$

On peut alors en déduire la pente de descente :

La pente de descente est donc d'autant plus faible que la finesse est importante.



Comme le montre le schéma ci-contre, la tangente de la pente correspond aussi au rapport de l'altitude perdue sur la distance parcourue : $\tan(p) = \frac{H}{D} = \frac{1}{f}$.

Connaissant f et H on peut calculer D : ……

Pour un aéronef donné, la finesse maximale correspond à une incidence de vol précise. Si la masse de l'aéronef augmente, la finesse maximale est inchangée mais la vitesse correspondante est plus élevée.

4.7 LE DECOLLAGE

Le décollage se décompose en trois phases :

- le roulement (1) :

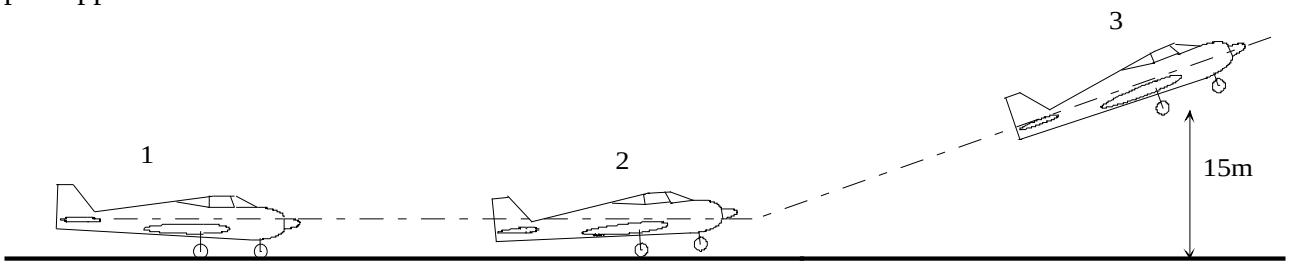
Pendant cette phase l'avion accélère sur la piste afin d'atteindre une vitesse lui permettant d'assurer sa sustentation par une portance suffisante. L'utilisation des volets permet de diminuer la vitesse nécessaire au décollage mais diminue l'accélération par augmentation de la traînée. En général on utilise un seul cran de volet. Cette position intermédiaire offre un bon compromis.

- la rotation (2) :

Lorsque la vitesse de décollage est atteinte, on effectue la rotation pour placer l'avion à l'assiette de montée. Cela augmente la portance par augmentation d'incidence. La sustentation va se produire.

- l'envol (3) :

Dans cette phase l'avion a quitté le sol mais en est encore très proche. Il faut continuer à accélérer pour assurer la prise d'altitude. Le décollage se termine au passage à la hauteur de 15 m par rapport au sol.



Un terrain situé à haute altitude, une forte température ou un vent arrière augmentent la longueur de décollage.

4.8 L'ATTERRISSAGE

L'atterrissage se décompose également en trois phases :

- la finale (1) :

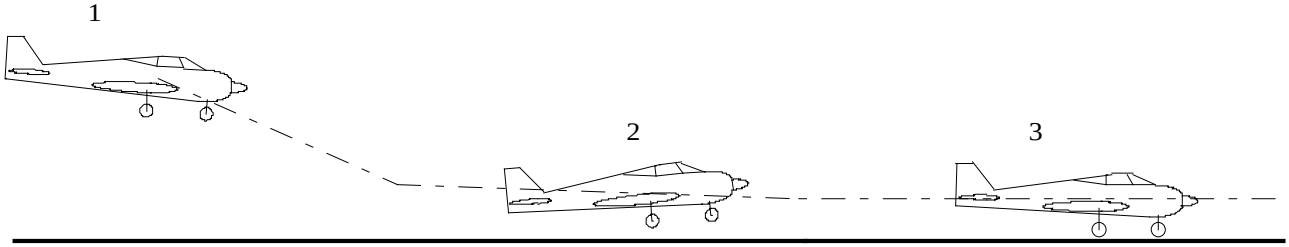
L'avion descend sur une pente stabilisée avec une vitesse constante. Par vent faible ou nul, le pilote sort les pleins volets et les becs afin de réduire la vitesse d'approche.

- l'arrondi (2) :

Près du sol le pilote réduit la pente de descente afin de tangenter le sol, on dit qu'il arrondit. Cette phase permet de prendre contact doucement avec la planète.

- la décélération (3) :

Une fois les roues au sol l'atterrissage n'est pas terminé. Il faut perdre sa vitesse sur la piste avant de pouvoir dégager vers le parking. Cette phase peut paraître une pure formalité mais il n'en est rien. Il faut rester vigilant pendant toute la décélération. Un freinage mal dosé peut entraîner un cheval de bois, un pylône ou une sortie de piste.

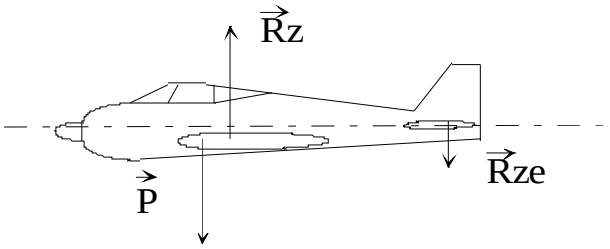


5 STABILITE STATIQUE D'UN AERONEF

5.1 STABILITE STATIQUE LONGITUDINALE

Pour qu'un avion soit facilement pilotable, il faut qu'il soit stable. C'est à dire qu'il ait tendance à compenser naturellement les petites variations de vitesse ou d'attitude non désirées qui peuvent survenir.

La stabilité est dite longitudinale quand on étudie les mouvements autour de l'axe de tangage. L'avion sera stable en incidence si une petite augmentation de l'incidence provoque un retour à la positon d'équilibre. Prenons l'exemple d'un avion de configuration classique (aile – empennage classique).



Dans ce type de configuration, le centre de gravité est …….. du foyer de l'aile et du centre de poussée.

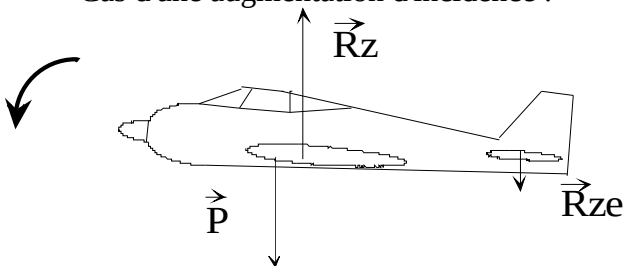
La voilure est ……..…….. et l'empennage est ……..…….. .

La portance de la voilure a tendance à faire basculer le nez de l'avion vers le bas mais la portance négative de l'empennage permet de contrer cette rotation afin d'assurer l'équilibre lorsque l'incidence varie un peu (sous l'effet d'une rafale de vent par exemple).

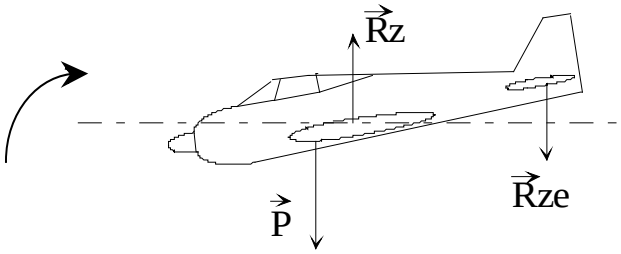
Dans le cas d'une augmentation d'incidence, la portance de la voilure augmente et celle de l'empennage devient moins négative. Il en résulte alors un couple à piquer qui tend à ramener l'avion dans sa position initiale.

Dans le cas d'une diminution d'incidence, il y a une diminution de la portance de la voilure et une augmentation de la déportance de l'empennage horizontal. Cela provoque un couple cabreur qui tend à ramener l'avion dans sa position d'origine.

Cas d'une augmentation d'incidence :



Cas d'une diminution d'incidence :



Un avion est stable longitudinalement si le foyer de l'aile est *en arrière* du centre de gravité de l'avion.

Plus un avion est centré avant, plus il est stable. Plus un avion est centré arrière, plus il est maniable.

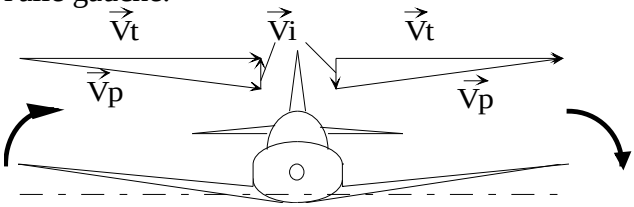
5.2 STABILITE STATIQUE TRANSVERSALE

La stabilité statique transversale concerne les rotations autour des axes ……..…….. lors des petites variations de dérapage et d'inclinaison.

Son étude est assez complexe et on ne retiendra que l'influence du dièdre, de la flèche, de la position de l'aile et de la dérive.

- l'effet de dièdre :

Si l'avion vole avec un dérapage à positif (le vent relatif souffle sur la droite du fuselage), un dièdre positif entraîne une augmentation de l'incidence de l'aile droite et une diminution de celle de l'aile gauche.

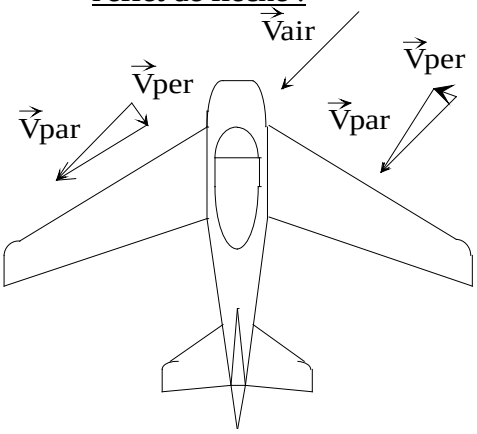


En décomposant le vent de travers en une composante parallèle à l'aile et une composante verticale, on voit que pour l'aile droite, v_i est orientée vers le haut (l'incidence est positive). Pour l'aile gauche c'est le contraire.

L'effet sur leur portance respective entraîne du roulis à gauche. Si le dièdre est négatif, l'effet est inversé (roulis à droite).

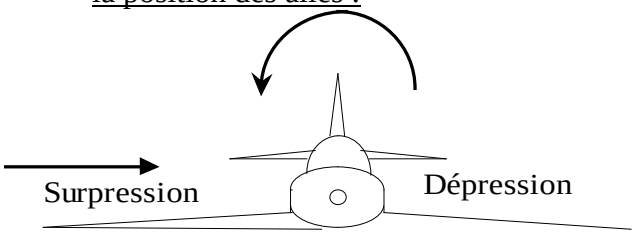
<u>En général, un dièdre positif augmente la stabilité latéral en roulis d'un aéronef et un dièdre négatif favorise l'instabilité.</u>

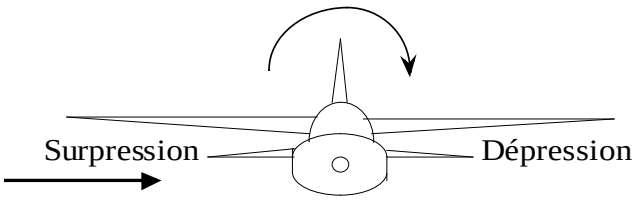
- l'effet de flèche :



Un dérapage positif donne une vitesse de l'air venant de la droite de l'appareil. Si on décompose celle-ci sur chacune des ailes en une composante parallèle au bord d'attaque (Vpar) et une composante perpendiculaire (Vper), on constate sur le schéma que la composante perpendiculaire de l'aile droite est nettement plus importante que celle de l'aile gauche. Or, en pratique la portance est générée par cette composante perpendiculaire. L'aile droite porte donc plus que l'aile gauche. Il en résulte un roulis à gauche. Si la flèche est inversée, l'effet est inversé. De même si le dérapage est négatif (vent relatif sur la gauche du fuselage), la rotation se fait à droite.

- la position des ailes :



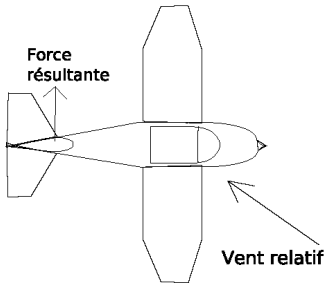


Sur une aile basse, un dérapage à droite entraîne une surpression sur l'extrados de l'aile droite et une dépression sur celui de l'aile gauche. Il en résulte un roulis à droite.

Sur une aile haute, le même dérapage entraîne la surpression sur l'intrados de l'aile droite et la dépression sur celui de l'aile gauche. Il en résulte un roulis à gauche.

- la dérive :

Un dérapage à droite entraîne une force aérodynamique vers la gauche sur la dérive. Etant donné la position de celle-ci il en résulte une rotation sur l'axe de lacet qui permet de réduire le dérapage. Il en résulte également un très léger effet de roulis par la gauche (mais bien souvent imperceptible si la taille de l'empennage vertical est raisonnable).



Pour assurer une stabilité transversale en roulis on adopte en générale les configurations suivantes :

type d'aile	**position**	**dièdre**
droite	haute	environ nul
droite	basse	positif
en flèche	basse	faiblement positif
en flèche	haute	fortement négatif

Il existe des solutions techniques diverses pour assurer la stabilité d'un aéronef. Toutefois les importants progrès des systèmes de commandes de vol électriques permettent de concevoir des avions légèrement instables.

Le pilotage assisté par l'ordinateur permet de rendre l'avion contrôlable. Les ordres donnés aux gouvernes pour assurer le maintien de l'appareil en ligne de vol sont gérés par l'ordinateur de bord. Aucun pilote ne serait en mesure de piloter de tels appareils sans son aide.

Ce type de système permet de voler en croisière à des incidences plus faibles pour les avions de ligne (gain de carburant car consommation moindre par diminution de traînée) et d'obtenir une meilleure manoeuvrabilité pour les avions de chasse.

Ce document a été réalisé par les coordonnateurs du CIRAS de l'Académie de LILLE (Frédéric WILLOT et Didier VANDERPERRE) à l'intention des animateurs des BIA. Il peut être reproduit et diffusé librement à des fins pédagogiques et non lucratives.

Crédits photographiques :

Les photographies et illustrations ont été réalisées par les auteurs.

Bibliographie :

« Initiation à l'aéronautique » T. du PUY de GOYNE, Y. PLAYS, P. LEPOURRY, J. BESSE Editions CEPADUES.

« Mécanique du vol » 2ème édition A.C. KERMODE Editions MODULO

« Manuel du pilote d'avion – vol à vue », SFACT Editions CEPADUES

« Manuel du pilote – vol à voile », SFACT Editions CEPADUES